

N° d'ordre
161

THESE

présentée

A LA FACULTE DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITE DE LYON

pour obtenir

LE DIPLOME DE DOCTEUR DE SPECIALITE
DE PHYSIQUE ELECTRONIQUE

par

J P FLEURQUIN

DETERMINATION DE CERTAINES CARACTERISTIQUES
TURBULENTES D'UN ECOULEMENT

Soutenue le 2 Nov. 1965 devant la commission d'examen

MM les professeurs

MESNARD

président

ASCH

MATHIEU

examineurs

TACUSSEL

T H E S E

présentée

A LA FACULTE DES SCIENCES

DE L' UNIVERSITE DE LYON

pour obtenir

LE DIPLOME DE DOCTEUR DE SPECIALITE

DE PHYSIQUE ELECTRONIQUE

par

J P FLEURQUIN

-----oOo-----

DETERMINATION DE CERTAINES CARACTERISTIQUES

TURBULENTES D 'UN ECOULEMENT

-----oOo-----

Soutenue le 2 Nov. 1965 devant la Commission d'examen

MM. les Professeurs

MESNARD

Président

ASCH

MATHIEU

Examineurs

TACUSSEL



Digitized by the Internet Archive
in 2026

UNIVERSITE DE LYON
=====

FACULTE DES SCIENCES
=====

Doyens honoraires

MM. LONGCHAMBON, DOUIN, MOUSSA, GAUTHIER Henri.

Professeurs honoraires

MM. LOCQUIN, de LARAMBERGUE, SOLLAUD, MENTZER, MOUSSA, JAFFARD, DOUIN, Henri EYRAUD, DEJARDIN, VIRET.

Doyen

M. BRACONNIER.

Assesseurs

MM. MESNARD, BOIDIN.

Professeurs

MM. LONGCHAMBON	Minéralogie
PRETTRE	Chimie industrielle
COURTY	Chimie-Physique
KUHNER	Botanique
MALECOT	Mécanique rationnelle et appliquée
PARIS	Chimie minérale
	Chimie
COLONGE	Chimie organique
JANIN	Physique générale
FLANDRIN	Géologie appliquée
BERNARD	Physique industrielle
DUFAY Jean	Astronomie
NIGON	Zoologie expérimentale
GAUTHIER Henri	Géologie générale
WAUTIER	Zoologie
CHOPIN	Chimie biologique
CUEILLERON	Chimie
BRACONNIER	Calcul différentiel et intégral
EYRAUD Charles	Chimie-Physique appliquée
SARAZIN	Physique nucléaire
BOIDIN	Microbiologie et Mycologie
PERES	Physiologie
MESNARD	Electronique
GRANDMONTAGNE	Physique
BOUTILLIER	Minéralogie
LAFOUCRIERE	Physique nucléaire théorique
DREUX	Chimie organique
TEICHNER	Chimie industrielle
PAVANS DE CECCATTY	Zoologie
MERLIN	Chimie analytique
DUFAY Maurice	Physique de l'atmosphère
LUBET	Physiologie
PHILBERT	Physique nucléaire

Professeurs (suite)

MM. COHEN-ADAD	Chimie
DAVID Louis	Géologie générale
CHANEL	Psychophysiologie
MAURY	Méthodes mathématiques de la physique
DEPRAZ	Physique nucléaire
GAUTHIER Jean	Chimie
GAUME	Physique expérimentale

Professeurs sans chaire

MM. FERON	Mathématiques
LAFORGUE	Physique
LEGAY	Zoologie expérimentale S.P.C.N.
UZAN	Physique S.P.C.N.
CHENEVOY	Géologie appliquée
GINET	Zoologie
ASCH	Physique
MICHEL Pierre	Minéralogie
DUCET	Biologie végétale
M ^{le} MAITROT	Physique
MM. GEVIN	Géologie générale
PONASSE	Mathématiques
d'INCAN	Physique
LEFEBVRE	Mathématiques
PERNET	Mathématiques
CHERY	Physique
BERGEON	Physique C.S.U.
M ^{le} GAUTHERON	Chimie biologie

Maîtres de Conférences

Mme ERICSON	Physique générale
MM. MARTEL	Mécanique
MATHIEU	Mécanique des fluides
ERBEIA	Physique
DESCOTES	Chimie organique
PICARD Philippe	Mathématiques
LEMOIGNE	Botanique
DEMARCO	Géologie générale
MICHEL Georges	Biochimie
LEBRETON	Biologie végétale
DAVID Jean	Biologie animale
TOUSSET	Chimie propédeutique
FEUVRAIS	Physique Electricité
PICARD Claude	Mathématiques
SCHMITT	Physique M.P.C.
LAURENT	Chimie organique
ROT	Mathématiques
BETHOUX	Mathématiques
M ^{le} CALAIS	Mathématiques
M. GUSAKOW	Physique

Maître de Conférences adjoint

M. PIERRON	Chimie
------------	--------

M. BURNET	<u>Conseiller administratif</u>
-----------	---------------------------------

M. ROUX	<u>Secrétaire Principal Honoraire</u>
---------	---------------------------------------

Je prie Monsieur le Professeur G. MESNARD, Directeur du laboratoire d'électronique et de physique du solide de la Faculté de Lyon, d'agréer mes respectueux remerciements pour avoir bien voulu accepter la haute direction de cette étude.

Je voudrais remercier d'une façon toute spéciale Monsieur le Professeur J. MATHIEU à qui je dois non seulement l'initiative de ce travail, mais aussi les conseils autorisés et les encouragements qui m'ont été si précieux. En me faisant largement profiter de toutes ses connaissances, il m'a permis de faire rapidement le point des recherches antérieures concernant le phénomène étudié. Je lui en témoigne ici ma profonde gratitude.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur le Professeur ASCH dont les cours m'ont été si utiles pour la compréhension, le calcul et la réalisation des circuits. Je voudrais aussi le remercier vivement d'avoir bien voulu accepter de faire partie de mon jury.

Monsieur J. TACUSSEL, tant par une connaissance approfondie de l'électronique théorique que par une grande expérience des circuits, m'a été d'un grand secours pour la réalisation de ce travail. Je souhaitais qu'il trouve ici mes vifs remerciements.

Mes remerciements iront aussi à Messieurs LECORNET et Michel AILLOUD dont les travaux et l'aide m'ont été très utiles pour commencer puis rédiger ce travail.

A Monsieur P. COMPARAT, Directeur de l'Ecole Centrale de Lyon, je dois le bienveillant accueil et appui qui m'ont toujours été réservés dans les différents laboratoires de son Ecole. Son obligeance et sa compréhension m'ont grandement facilité la préparation de cette thèse et je lui en exprime toute ma reconnaissance.

Mes remerciements vont enfin à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont préparé ou aidé à poursuivre cette étude. Qu'en particulier, mes Parents et tous mes Professeurs trouvent ici l'expression de ma respectueuse reconnaissance.

Si, de nos jours, la turbulence a été aussi largement étudiée, cela tient sans doute à ce qu'elle joue un très grand rôle dans tous les problèmes qui intéressent l'ingénieur. Son apparition dans un écoulement accélère la transformation d'énergie mécanique en chaleur. Dans les transferts thermiques, c'est elle qui conditionne dans une très large mesure les échanges de chaleur entre un fluide et une paroi. On pourrait bien sûr allonger la liste des exemples mettant en évidence l'importance de ce phénomène.

Pour déterminer de quelle manière le mouvement turbulent sous-jacent affecte les caractéristiques moyennes cinématiques ou thermiques d'un écoulement, on peut considérer soit l'équation de quantité de mouvement, soit l'équation d'énergie. Portons par exemple notre regard sur l'aspect cinématique du problème. A condition d'introduire les caractéristiques instantanées du fluide (vitesse, pression), et non leur valeur moyenne, on admet généralement que les équations de NAVIER restent valables pour un écoulement turbulent. Du fait de la non-linéarité de ces équations, il apparaît dans l'expression du mouvement moyen, un terme de corrélation double entre vitesses fluctuantes. Si l'on tentait d'étudier l'histoire de ces corrélations doubles, on trouverait une nouvelle relation dans laquelle apparaîtrait des corrélations triples... Dès le départ on se trouve devant le caractère irréductible du problème; les équations qui régissent le phénomène forment une chaîne ouverte.

Les théories phénoménologiques développées par BOUSSINESQ, PRANDTL, TAYLOR, ... tentent de fermer immédiatement la chaîne en rattachant, de façon plus ou moins plausible, la corrélation double des vitesses au mouvement moyen. Cette manière d'aborder le problème reste de portée limitée, les variations des différents paramètres introduits (coefficient de diffusion turbulente, longueur de mélange), ne pouvant se rattacher commodément à la configuration géométrique de l'écoulement. Des expériences récentes sur les jets pariétaux ont même montré qu'il n'existait pas de liaisons physiques possibles, du type de celles introduites par les auteurs précités, entre corrélations et gradient de vitesse moyenne. En effet, pour ce type de jet, la contrainte tangentielle ne s'annule pas aux points de vitesse moyenne maximale. Ainsi, la simple étude du mouvement moyen nécessite la prise en considération du mécanisme de la turbulence.

Le caractère aléatoire des fluctuations turbulentes conduit à les étudier d'abord en elle même, en déterminant leur fonction de répartition, puis dans leur rapport mutuel, en faisant intervenir les corrélations. L'aspect statistique a le premier été développé. Devant la complexité du mécanisme turbulent, TAYLOR s'attacha à l'étude d'un modèle particulièrement simple que l'expérience révélait sensiblement isotrope: la turbulence créée par une grille. Le phénomène était en principe régi par l'équation de KARMAN-HOWARTH reliant les corrélations double et triple.

Cette relation a été étendue depuis par M. CRAYA au cas d'écoulements turbulents homogènes possédant un gradient de vitesse moyenne. Si jusque là, seule était possible l'étude des turbulences en déclin, l'introduction d'un terme relatif à la production d'énergie turbulente permettait d'envisager des recherches sur des régimes stationnaires.

Depuis TAYLOR, de nombreux modèles expérimentaux furent étudiés

La plupart de ces travaux comportent, outre le relevé du profil de vitesse, des mesures de turbulence

Dans les couches limites, les jets, les sillages, de nombreux auteurs relevèrent la distribution des fluctuations longitudinales et transversales de vitesse, les corrélations et parfois les fonctions de répartition.

Les nombreuses recherches effectuées dans ce domaine ont eu entre autres avantages, celui d'avoir révélé le phénomène d'intermittence.

Les zones turbulentes d'un écoulement apparaissent séparés du fluide ambiant par une surface aux amples mouvements. Les mesures réalisées en bordure de jet n'ont alors aucune interprétation possible si l'on ne connaît pas les temps respectifs pendant lesquels la sonde est placée dans l'un ou l'autre milieu.

Le facteur d'intermittence a précisément été défini pour chiffrer l'importance relative de ces deux temps.

S'il est inutile de rappeler l'importance physique que présente la détermination de ce facteur, nous soulignerons l'intérêt que peut avoir la réalisation d'un appareil permettant cette étude, car, quand bien même la mesure de l'intermittence n'aboutirait pas, il permettrait de toute façon le relevé des fonctions de répartition et, moyennant des aménagements tout à fait minimes, celle des densités de probabilité.

LA MESURE DU FACTEUR D'INTERMITTENCE

Comme le faisait remarquer CORRSIN en 1943, un jet est limité par une surface irrégulière séparant le fluide turbulent du fluide contigu non turbulent (fig. 1). L'importance de ce phénomène, retrouvé dans une couche limite, a été soulignée par TOWNSEND (1949). Plus tard, CORRSIN et KISTLER en entreprenaient l'étude dans un jet rond (1954).

Les deux types d'écoulements existant à l'intérieur et à l'extérieur du jet, qui peuvent être mis en évidence par des procédés optiques, sont susceptibles d'influencer de façon différente une sonde anémométrique. Ainsi, lorsqu'une telle sonde est suffisamment éloignée de l'axe du jet pour se trouver au cours du temps alternativement plongée dans chacun des écoulements, le signal recueilli présente un caractère intermittent qui complique singulièrement l'exploitation des mesures faites dans ces conditions. Ceci justifie d'ailleurs l'intérêt qui a très vite été porté à l'évaluation de la fraction du temps pendant lequel la sonde est dans le fluide turbulent. Ce nombre, introduit par TOWNSEND, a été appelé : "facteur d'intermittence".

En supposant la sonde repérée par ses coordonnées x, y , dans un jet dont la limite est $Y(x, t)$ dans le plan de symétrie du jet contenant la sonde, on vérifie facilement que le facteur d'intermittence $\chi(x, y)$ peut s'exprimer en termes de probabilités:

$$\chi(x, y) = \text{Prob. } (y \leq Y(x, t) \leq \infty)$$

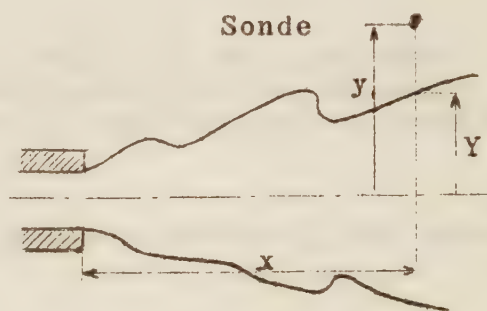


fig. (1)

Naturellement la mesure de l'intermittence suppose la possibilité de détection de la turbulence. Des différents critères utilisés, résultent plusieurs méthodes de mesures dont nous allons rappeler les principales.

Mesures indirectes

Elles sont basées sur l'adoption à priori des deux hypothèses suivantes :

- La loi probabiliste de répartition des vitesses est la même en tous points du fluide turbulent intéressé par le phénomène d'intermittence.
- La turbulence est nulle à l'extérieur du jet.

En réalité, si l'hypothèse d'une structure homogène est déjà grossière pour la partie centrale du jet, elle apparaît encore plus hardie lorsqu'on l'applique aux régions marginales de l'écoulement. D'autre part, le fluide environnant le jet n'est pas absolument au repos, des vitesses y étant induites par la limite mouvante de celui-ci.

Supposons malgré tout ces hypothèses vérifiées. Désignons par e le signal de la sonde en un point quelconque du jet, et par e_T le signal qui serait obtenu si la sonde, en ce même point, était constamment plongée dans le fluide turbulent. (autrement dit, e_T représente le signal résultant de la juxtaposition des fluctuations constituant les bouffées turbulentes). En réservant les lettres sur-lignées pour désigner les moyennes dans le temps, on peut alors écrire :

$$\overline{e^2} = \gamma \overline{e_T^2}$$

$$\overline{e^3} = \gamma \overline{e_T^3}$$

.....

expressions qui ne font que transcrire la propriété de la moyenne d'une somme d'être égale à la somme des moyennes dans le cas particulier où l'une d'elles est nulle (comme il résulte de la deuxième hypothèse).

Chacune de ces égalités permettrait de déduire γ des mesures de $\overline{e^n}$ et $\overline{e_T^n}$

Si la mesure de $\overline{e^n}$ ne présente aucune difficulté, celle de $\overline{e_T^n}$ n'est pas possible sur la bordure du jet donnant

précisément lieu au phénomène d'intermittence. En effet, par suite des variations de l'échelle des amplitudes en s'éloignant de l'axe du jet, on ne peut envisager de confondre la valeur de ce moment $\overline{e^n}$ avec celle qui serait obtenue dans une zone entièrement turbulente.

Ainsi apparaît la nécessité de la première hypothèse permettant la détermination de γ à partir de combinaisons adimensionnelles de ces moments. On utilise surtout les coefficients de dissymétrie et d'aplatissement :

$$S = \frac{\overline{e^3}}{(\overline{e^2})^{3/2}} = \frac{S_T}{\sqrt{\gamma}}$$

$$T = \frac{\overline{e^4}}{(\overline{e^2})^2} = \frac{T_t}{\gamma}$$

S_T et T_t sont respectivement les coefficients de dissymétrie et d'aplatissement en fluide totalement turbulent.

Mesures directes

- Une première méthode consiste à matérialiser (par exemple par le procédé de la strioscopie) la limite du jet à chaque instant. Le facteur d'intermittence se déduit alors de l'expression (1). Des méthodes semblables ont déjà été utilisées pour les liquides où la mise en suspension de poudres permet une visualisation des tourbillons.
- En admettant que le fluide turbulent puisse être caractérisé par l'amplitude ou la fréquence de ses fluctuations de vitesse (c'est-à-dire qu'à l'extérieur du jet, les fluctuations soient d'amplitudes négligeables, ou discriminables par leurs fréquences), il suffit de mesurer le temps pendant lequel ce type de fluctuations existe. Le facteur d'intermittence est alors le rapport de ce temps à la durée totale de mesure.

JOHNSON a imaginé un appareil basé sur ce principe. Il a été utilisé par CORRSIN et KISTLER (1955). Cet appareil a l'avantage de permettre une détermination directe du facteur d'intermittence. Par contre, les fluctuations de vitesse existant à l'extérieur du jet, et auxquelles nous avons déjà fait allusion, rendent les mesures délicates et assez subjectives. L'opérateur doit en effet effectuer à vue, sur un oscilloscope à deux voies, une discrimination d'amplitude (choix du seuil).

Due à KOVASZNAY, une méthode se rapprochant de cette dernière consiste à utiliser une sonde à 4 fils, uniquement sensible aux fluctuations du tourbillon. Celles-ci seraient plus caractéristiques de la turbulence (1) voir aussi page 37 . Cette solution ne semble pas avoir été expérimentée souvent, probablement en raison de la difficulté de réalisation de la sonde.

Il convient de remarquer dès à présent, les incertitudes inhérentes à chacune de ces méthodes de mesure. Les hypothèses qu'elles introduisent sont difficilement contrôlables expérimentalement, ou ne sont qu'approximativement vérifiées lors des essais.

Dans l'étude qui suit, nous nous sommes proposés de reprendre la mesure directe du facteur d'intermittence à partir des fluctuations de vitesse.

Afin de remédier à quelques-uns de ses inconvénients, nous avons d'abord apporté plusieurs modifications à l'appareil précédemment utilisé.

Dans l'espoir de remplacer le réglage à vue effectué antérieurement par la mise en évidence d'un accident des relevés d'intermittence, nous avons effectué des mesures systématiques de celle-ci en fonction d'un seuil d'amplitude, puis d'une discrimination de fréquence.

Le travail qui suit, comprend les principaux points suivants :

- Etude rapide d'un appareil antérieur.
- Critique de cet appareil.
- Solution proposée.
- Extension possible de son emploi.
- Résultats de quelques mesures.

CHAPITRE 1

une SOLUTION ANTERIEURE

APPAREILS ANTERIEURS

Bien que ce ne soit pas le seul appareil existant, nous ne décrivons ici que celui de JOHNSON qui constitue une version améliorée de l'électronique initialement utilisée par CORRSIN et KISTLER.

Principe

L'appareil, conçu pour être utilisé avec un anémomètre à fil ou à film chaud, est essentiellement constitué par un dispositif de discrimination d'amplitude. Celui-ci compare le signal introduit, avec un niveau de référence fixé servant de seuil. La sortie du discriminateur assure la modulation par tout ou rien d'un train continu d'impulsions destinées au comptage. De cette façon, des impulsions ne peuvent être enregistrées par le compteur que pendant les intervalles de temps où le signal d'entrée est d'amplitude supérieure au seuil fixé.

En réalité, pour corriger une erreur inhérente à l'existence d'un seuil, deux modulations successives sont utilisées.

Principales opérations effectuées dans l'appareil :

Au cours de son traitement dans l'appareil, le signal issu de la chaîne anémométrique, subit les modifications suivantes: (Les transformations du signal lors de ces différentes opérations sont représentées, dans le cas d'un signal idéal, sur la planche (1)).

- Déplacement du potentiel moyen du signal pour obtenir l'effet de seuil recherché. Il doit permettre la suppression des fluctuations parasites du signal (bruits de fond de la chaîne d'amplification et fluctuations de vitesse dans le fluide non-turbulent).
- Redressement double alternance :
Il rend possible la considération simultanée des signaux supérieurs et inférieurs à la moyenne (réalisé avec la double diode 6 AL 5).
- Amplification continue :
Elle donne au signal une amplitude suffisante pour commander la porte qui suit (pentode 6 AU 6).
- Modulation par tout ou rien d'impulsions à 100 KHz. Le signal précédemment amplifié est appliqué à la supprimeuse d'une pentode (6 AS 6).

- Correction de l'effet de seuil:

Elle a pour but de compenser les intervalles de temps β rognés par le seuil, c'est-à-dire le temps pendant lequel le signal, bien que faisant partie d'une bouffée turbulente, se trouve inférieur au seuil choisi (bascule monostable constituée par la double-triode 6 J 6).

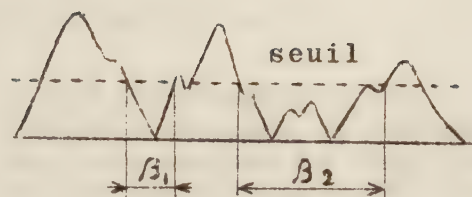


fig. 2

- Modulation par tout ou rien d'impulsions à 5,5 KHz par la sortie de l'étage correcteur (porte, penthode 6 AS 6)
- Il ne reste plus, pour effectuer une mesure, qu'à compter le nombre d'impulsions traversant cette deuxième porte.

Schéma

Le schéma de l'appareil de JOHNSON est donné dans la planche (2).

Fonctionnement :

Le signal d'un anémomètre, convenablement amplifié puis symétrisé, est introduit dans l'appareil. Les capacités de $0,5 \mu F$ le débarrassent de sa composante continue et permettent la modification du niveau moyen de ce signal par action sur les potentiomètres de seuil P.

En l'absence de fluctuations à l'entrée, les cathodes de la double-diode V_1 sont à un potentiel positif (fixé par les potentiomètres P) et la diode ne conduit pas. Par contre, lorsqu'un signal est appliqué, et dépasse une amplitude fixée par le seuil choisi, l'une des deux diodes se met à conduire, abaissant ainsi le potentiel du point A. Cette variation se retrouve inversée et amplifiée dans la charge de plaque (5 K) de la penthode 6 AU 6 qui fonctionne en amplificateur continu (d'où la réaction inévitable de cathode qui ne peut être découplée). La sortie de cet étage amplificateur est ramenée à un niveau continu convenable (légèrement inférieur à celui de la masse) par une chaîne potentiométrique reliée au pôle moins de la haute tension (résistance de 47 K, 33 K ; potentiomètre de 25 K).

La penthode 6 AS 6, polarisée par le courant de fuite de grille dans une résistance de $1 M\Omega$, reçoit sur sa première grille G_1 un signal carré à 100 KHz, transmis par les condensateurs de $0,001 \mu F$ et $0,1 \mu F$, et dont l'amplitude est limitée par la demi 6 AL 5 V_{2a} .

- sur sa grille supprimeuse G₃, le signal recueilli en S.

Le seuil étant nul, le curseur du potentiomètre S est réglé de façon telle qu'en l'absence du signal d'entrée, le courant anodique du tube 6 AS 6 soit à la limite de la coupure. Ce tube joue ainsi le rôle de porte et ne laisse passer les impulsions à 100 KHz introduites sur G₁, que pendant les intervalles de temps où le signal d'entrée possède une amplitude suffisante. Dans ce cas, les impulsions sont dirigées vers une bascule à travers le condensateur de 100 pF. Cette bascule monostable, constituée avec la double-triode 6 J 6, ne diffère du trigger de SCHMITT décrit plus en détail page 20, que par la substitution d'un couplage alternatif entre la plaque du tube I et la grille du tube II (condensateur de 50 pF) au couplage continu (par résistances) existant dans le trigger de SCHMITT. Ce montage a la propriété de donner, après excitation, une impulsion de sortie, de durée constante, ajustable au moyen de P'. C'est son retour, différé à l'état stable, qui est mis à profit dans la correction de l'effet de seuil. La sortie de cette bascule est appliquée à la supprimeuse d'un deuxième tube 6 AS 6, dont le montage et le rôle sont absolument semblables à ceux du précédent. Elle reçoit sur sa grille G₁ des impulsions à 5,5 KHz, obtenues par dérivation d'un signal carré de même fréquence (capacité de 100 pF et résistance de 25 K) suivie de l'écrêtage des impulsions négatives par la demi 6 AL 5 V_{2b}. Les impulsions franchissant cette porte, sont alors transmises au compteur par le condensateur de 500 pF qui supprime la composante continue du signal recueilli sur l'anode.

Les tubes à gaz à cathode froide OA 2 et OB 2 assurent la stabilisation des tensions continues d'alimentation de l'appareil.

Emploi

Supposons réalisés un certain nombre de réglages purement électroniques (action sur S, S', M et N), et regardons comment cet appareil est utilisé en pratique pour réaliser des mesures d'intermittence. Deux façons de procéder sont envisageables :

- a) - Réglage du seuil et de sa correction par comparaison directe de la réponse de l'appareil et du signal que l'on y introduit. Un oscilloscope à deux voies reçoit d'une part, la sortie de chaîne, d'autre part, le train d'impulsions destiné au compteur, ou mieux, la sortie de la bascule monostable. Cette même sortie peut être utilisée pour moduler la tension de WEHNELT si l'on ne dispose que d'un oscilloscope à un seul canal. Cette méthode rapide a l'inconvénient de faire intervenir un facteur personnel d'appréciation.

b - Réglage en deux temps qui comprend :

- Le choix du seuil, pour qu'à la limite extérieure du jet l'intermittence obtenue soit nulle (suppression du bruit de fond de la chaîne et des fluctuations parasites de vitesse existant à l'extérieur du jet).
- Le réglage de la constante de temps du circuit de correction de seuil pour qu'à l'intérieur du jet, une intermittence unitaire soit obtenue.

Cette façon de procéder n'est pas plus sûre que la précédente puisqu'elle fait appel à une large hypothèse d'homogénéité supposant l'amplitude des fluctuations de vitesse indépendante de la position de la sonde quand celle-ci se déplace dans une section normale du jet.

D'autres appareils, basés sur le même principe, n'utilisent qu'une seule modulation. Un circuit RC remplace alors l'étage correcteur (voir réf. (1) et (3)). Par suite de la décroissance exponentielle des signaux obtenue dans ce circuit RC, ce type de compensation est gênant. Il rend en effet la réponse de l'appareil fonction de la valeur du seuil. On peut également lui reprocher d'être influencé par l'amplitude du signal traité.

CRITIQUES

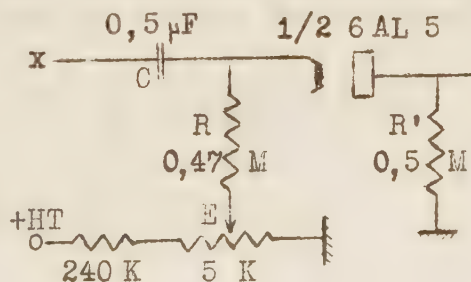
L'étude de chacune des opérations effectuées dans l'appareil qui vient d'être décrit, a permis de constater les inconvénients suivants :

Fixation du seuil :

Le seuil dépend de l'amplitude du signal appliqué.

Le dispositif utilisé étant symétrique, une moitié seulement du schéma est reproduite ci-contre.

Déterminons la tension moyenne s'établissant aux bornes de la capacité C quand un signal quelconque est appliqué à l'entrée.



Soit :

$$U = A - E + \frac{\int_0^{t_1} \frac{1}{R} x dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{D} x dt}{\frac{t_1}{R} + \frac{t_2 - t_1}{D}}$$

Et, puisque l'on a, par suite de la définition même de x :

$$\int_0^{t_2} x dt = 0 \quad (1)$$

$$U = A - E + \frac{\left(\frac{1}{D} - \frac{1}{R} \right) \int_{t_1}^{t_2} x dt}{\frac{t_1}{R} + \frac{t_2 - t_1}{D}} \quad (2)$$

La fraction du deuxième membre n'est en général pas nulle et dépend de l'amplitude de x. Autrement dit, le seuil est non seulement modifié par le passage d'une bouffée turbulente, mais dépend encore de l'amplitude des fluctuations existant lors de cette bouffée ;

Les croquis ci-contre mettent en évidence cet inconvénient dans le cas particulier d'un signal carré. Ils ont été réalisés pour la valeur $D = R/2$ qui correspond sensiblement au cas du montage de JOHNSON (en supposant r très inférieur à R'). Le premier graphique représente, en régime établi, l'intensité traversant la capacité. Sa moyenne est donc nulle. Le deuxième donne la forme de la tension en A qui lui correspond. Ses alternances négatives sont d'amplitude deux fois plus petite que les parties positives, puisque ces dernières doivent produire un débit de courant identique (au signe près) dans une résistance double. On aboutit bien entendu au même résultat en calculant la valeur de U dans ce cas particulier.

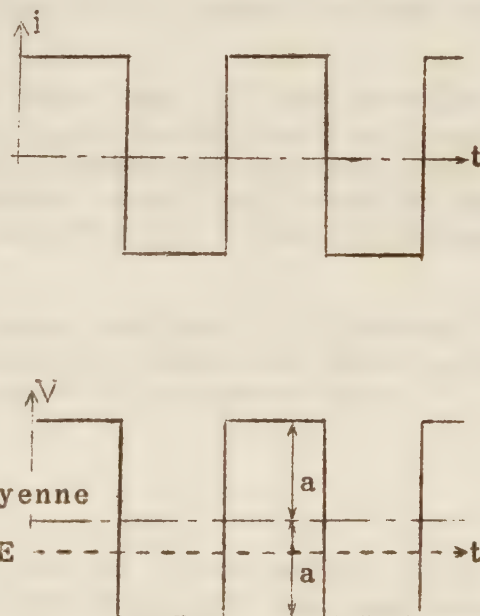


Fig. 3

$$U = A - E - a/3$$

a représentant la demie hauteur du signal carré

En définitive, la moyenne ne coïncide plus avec la valeur de E choisie pour le seuil.

Remèdes :

L'interférence gênante de l'amplitude du signal étudié avec la valeur effective du seuil, ne peut être supprimée que par l'annulation du dernier terme de la formule (2). Si l'on tient à conserver le montage initial, il faut alors imposer pour le choix des éléments la condition $D = R$. Elle revient à rendre R négligeable par rapport à R' comme on peut le voir dans l'expression de D .

Pour ce faire, deux possibilités sont envisageables :

a/ - Augmenter R'

On est limité dans ce sens par la réponse en haute fréquence du dispositif, qui diminue avec l'augmentation de R' .

b/ - Diminuer R .

On est limité cette fois :

- Par la réponse en basse fréquence qui dépend de la constante de temps du circuit RC.
- Par l'accroissement de la capacité C . les condensateurs électrolytiques n'étant pas utilisables ici à cause de leur courant de fuite.

Signalons que des progrès récents dans la construction des condensateurs permettraient aujourd'hui, de résoudre ce problème de façon très satisfaisante. En effet, avec les condensateurs au papier métallisé ou au mylar, de fortes capacités, peuvent être atteintes sous un volume réduit, tout en conservant une résistance d'isolement élevée.

Remarquons enfin, que l'on peut remédier à l'inconvénient du précédent montage en rétablissant sa symétrie. Nous avons eu recours à cette solution dans la version transistorisée de l'appareil (P. 29)

Modulations d'impulsions

Si ce procédé convient assez bien à la mesure de l'intermittence dont le spectre des fréquences est, dans les cas usuels très limité vers les fréquences élevées (environ 500 Hz pour des vitesses d'une cinquantaine de mètres par seconde), elle restreint cependant l'emploi de cet appareil à ces phénomènes de basses fréquences. Sa précision décroît en effet rapidement avec la fréquence des signaux étudiés, et rend en particulier impossible certaines mesures ci-après désignées.

Ajoutons, pour terminer ce paragraphe, qu'outre la multiplication des réglages nécessités par la double modulation, cette façon de procéder peut donner lieu à des interférences sur lesquelles nous reviendrons après l'étude de la bascule monostable.

Enfin cet appareil nécessite l'emploi de deux générateurs d'impulsions suffisamment stables.

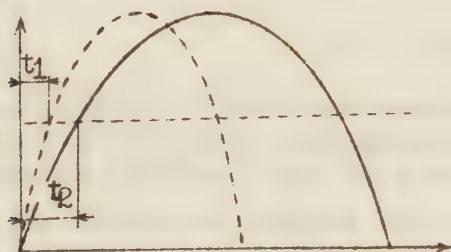
Correction de l'effet du seuil :

Si la bascule monostable utilisée pour cette correction a l'avantage de prolonger de façon précise la durée du signal, elle présente par contre l'inconvénient de rester insensible un court instant à la suite de son retour au zéro. Cette insensibilité est, dans le cas le plus défavorable, égale au $1/7$ de la période totale d'un cycle (voir référence (2)). L'erreur, dans ces conditions, est de 14 % par rapport au nombre d'impulsions prévu théoriquement.

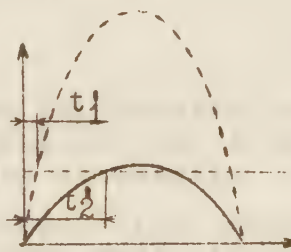
Une mesure précise devra donc se référer à une courbe d'étalonnage donnant, pour chaque valeur de la correction, le nombre maximal d'impulsions susceptibles d'être recueillies.

Le retard, introduit par la bascule, doit alors être repéré soit par la position du potentiomètre P', soit par contrôle direct à l'oscilloscope. Notons que cette façon peu pratique de procéder n'est rigoureusement exacte qu'avec un signal d'amplitude et de fréquence déterminées ou plus précisément, dont l'amplitude et la fréquence sont liées par une certaine relation que nous n'explicitons pas.

Les deux croquis donnés ci-dessous, mettent en évidence ces deux influences.



Effet
de la fréquence



Effet
de l'amplitude

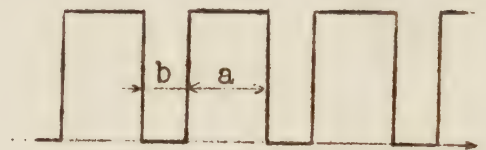
Revenons maintenant sur l'éventualité signalée précédemment d'interférences entre les impulsions à 5,5 KHz et le dispositif de correction de l'effet de seuil.

- soit T l'intervalle de temps séparant 2 impulsions consécutives fournies par le générateur à 5,5 KHz.
- soit T_c la durée d'un cycle de la bascule monostable pour le réglage considéré (cette période est quantifiée par les impulsions à 100 KHz).

Admettons qu'à la suite d'un glissement en fréquence des générateurs, et par un choix malheureux de la correction, $T_c = T$ se trouve réalisé.

Alors, toutes les impulsions correspondant à une même bouffée turbulente traversent ou sont bloquées par la deuxième porte

sortie de la bascule monostable



Notant respectivement :

" a " le temps d'insensibilité de la bascule, quantifié par le générateur à 100 KHz.

" b " le temps pendant lequel la bascule reste, après excitation, dans son état instable.



La probabilité pour qu'une bouffée soit **enregistrée** est :

$$p = \frac{b}{a + b}$$

celle de ne pas l'être : son complément à l'unité,

$$q = \frac{a}{a + b}$$

Considérant l'enregistrement des bouffées turbulentes comme une suite d'épreuves indépendantes de même probabilité, l'échantillonnage réalisé par la mesure suit une loi binomiale.

Si le temps de mesure est suffisant, la répartition obtenue peut se représenter à l'aide d'une loi gaussienne dont l'écart type est :

$$\sqrt{Npq}$$

N représentant le nombre de bouffées turbulentes ayant défilé devant la sonde pendant la durée de l'essai.

Estimant à 100 ce nombre, valeur pouvant être considérée comme un ordre de grandeur pour une mesure de 10 secondes, on obtient :

$$\sqrt{100 \cdot 0,143 \cdot 0,857} = 3,5$$

Une erreur de 3,5 % est donc possible dans 50 % des mesures.
" " " 10,5 % l'est encore avec une probabilité de 1 %.

Remarque :

Ces écarts ne tiennent naturellement pas compte de la dispersion propre au phénomène étudié.

CHAPITRE 2

SOLUTION PROPOSEE

APPAREIL PROPOSE

En modifiant l'appareil imaginé par JOHNSON, nous nous sommes efforcés de répondre aux impératifs suivants :

- remédier, dans la mesure du possible, aux critiques qui viennent d'être formulées,
- simplifier l'appareil,
- faciliter son emploi,
- augmenter sa précision,
- étendre ses possibilités.

Principe

Le principe même de l'appareil n'a pas été modifié. Les fluctuations de vitesse, comme précédemment, sont considérées comme critère de turbulence.

En ce qui concerne sa réalisation proprement dite, il faut toutefois signaler que la mesure discrète (comptage d'impulsions) utilisée dans l'appareil de JOHNSON, a été remplacée par une intégration continue.

Principales opérations

Le signal d'un anémomètre à fil chaud, est successivement traité dans cinq étages assurant les fonctions suivantes :

- Redressement double alternance
- Détermination du seuil
- Amplification continue
- Discrimination et intégration
- Mesure (comptage)

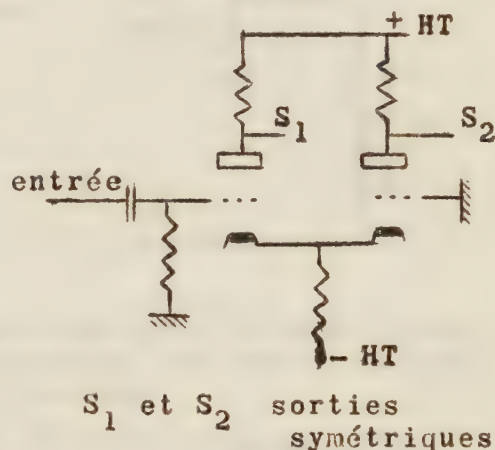
Description des différents étages :

1) Etage d'entrée :

Afin de rendre possible l'emploi de l'appareil quelle que soit la chaîne anémométrique utilisée, et en particulier dans les cas de :

- sortie dissymétrique de celle-ci,
- sortie à niveau relativement faible,

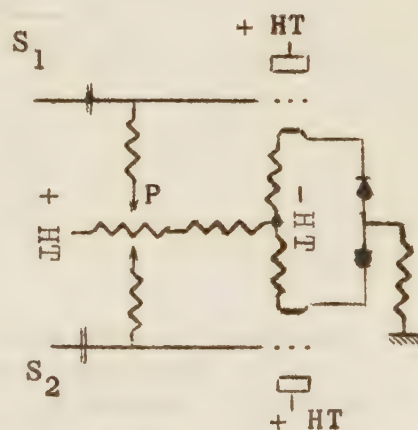
le signal issu de la chaîne pénètre d'abord dans un étage amplificateur et symétriseur. Il s'agit d'un déphaseur de SCHMITT, conforme au schéma rap-pelé ci-contre, aussi appelé mon-tage différentiel ou "long tailed pair". Le tube E 188 CC a été choi-si pour sa faible résistance inter-ne et son coefficient d'amplifica-tion moyen. Ces caractéristiques conduisent à un gain relativement élevé avec des charges de plaques faibles, et assurent à ce montage une large bande passante.



2) Etage séparateur et de redressement double alternance :

Pour éviter toute interférence du signal d'entrée sur la valeur du seuil, les éléments redresseurs ont été isolés des capacités de liaison affranchissant de la composante continue du signal. Cette séparation est très simplement obtenue par des étages à charges cathodiques, comme le montre le schéma. Le montage est symétrique. Le tube E 188 CC a été retenu pour sa forte pente, (12,5 mA/V), permettant d'attaquer les circuits re-dresseurs sous faible impédance ($1/s = 80 \text{ Ohms}$).

La résistance de charge des diodes est un compromis entre l'impédance de sortie des cathodynes et celle de la chaîne potentiométrique utilisée pour la détermination du seuil. Suffisamment élevée par rapport à la première, elle n'introduit que peu d'atténuation des signaux traités. Faible par rapport à la résistance de la chaîne poten-tiométrique de seuil, elle limite la distorsion de réponse pour les débits faibles des diodes. Cette solution a été préférée au montage en pont parce qu'il ne nécessitait pas l'appariement des diodes.



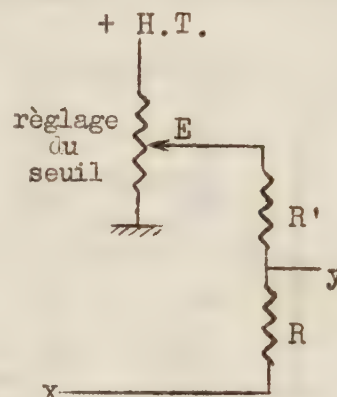
1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100. 101. 102. 103. 104. 105. 106. 107. 108. 109. 110. 111. 112. 113. 114. 115. 116. 117. 118. 119. 120. 121. 122. 123. 124. 125. 126. 127. 128. 129. 130. 131. 132. 133. 134. 135. 136. 137. 138. 139. 140. 141. 142. 143. 144. 145. 146. 147. 148. 149. 150. 151. 152. 153. 154. 155. 156. 157. 158. 159. 160. 161. 162. 163. 164. 165. 166. 167. 168. 169. 170. 171. 172. 173. 174. 175. 176. 177. 178. 179. 180. 181. 182. 183. 184. 185. 186. 187. 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 197. 198. 199. 200. 201. 202. 203. 204. 205. 206. 207. 208. 209. 210. 211. 212. 213. 214. 215. 216. 217. 218. 219. 220. 221. 222. 223. 224. 225. 226. 227. 228. 229. 230. 231. 232. 233. 234. 235. 236. 237. 238. 239. 240. 241. 242. 243. 244. 245. 246. 247. 248. 249. 250. 251. 252. 253. 254. 255. 256. 257. 258. 259. 260. 261. 262. 263. 264. 265. 266. 267. 268. 269. 270. 271. 272. 273. 274. 275. 276. 277. 278. 279. 280. 281. 282. 283. 284. 285. 286. 287. 288. 289. 290. 291. 292. 293. 294. 295. 296. 297. 298. 299. 300. 301. 302. 303. 304. 305. 306. 307. 308. 309. 310. 311. 312. 313. 314. 315. 316. 317. 318. 319. 320. 321. 322. 323. 324. 325. 326. 327. 328. 329. 330. 331. 332. 333. 334. 335. 336. 337. 338. 339. 340. 341. 342. 343. 344. 345. 346. 347. 348. 349. 350. 351. 352. 353. 354. 355. 356. 357. 358. 359. 360. 361. 362. 363. 364. 365. 366. 367. 368. 369. 370. 371. 372. 373. 374. 375. 376. 377. 378. 379. 380. 381. 382. 383. 384. 385. 386. 387. 388. 389. 390. 391. 392. 393. 394. 395. 396. 397. 398. 399. 400. 401. 402. 403. 404. 405. 406. 407. 408. 409. 410. 411. 412. 413. 414. 415. 416. 417. 418. 419. 420. 421. 422. 423. 424. 425. 426. 427. 428. 429. 430. 431. 432. 433. 434. 435. 436. 437. 438. 439. 440. 441. 442. 443. 444. 445. 446. 447. 448. 449. 450. 451. 452. 453. 454. 455. 456. 457. 458. 459. 460. 461. 462. 463. 464. 465. 466. 467. 468. 469. 470. 471. 472. 473. 474. 475. 476. 477. 478. 479. 480. 481. 482. 483. 484. 485. 486. 487. 488. 489. 490. 491. 492. 493. 494. 495. 496. 497. 498. 499. 500. 501. 502. 503. 504. 505. 506. 507. 508. 509. 510. 511. 512. 513. 514. 515. 516. 517. 518. 519. 520. 521. 522. 523. 524. 525. 526. 527. 528. 529. 530. 531. 532. 533. 534. 535. 536. 537. 538. 539. 540. 541. 542. 543. 544. 545. 546. 547. 548. 549. 550. 551. 552. 553. 554. 555. 556. 557. 558. 559. 560. 561. 562. 563. 564. 565. 566. 567. 568. 569. 570. 571. 572. 573. 574. 575. 576. 577. 578. 579. 580. 581. 582. 583. 584. 585. 586. 587. 588. 589. 590. 591. 592. 593. 594. 595. 596. 597. 598. 599. 600. 601. 602. 603. 604. 605. 606. 607. 608. 609. 610. 611. 612. 613. 614. 615. 616. 617. 618. 619. 620. 621. 622. 623. 624. 625. 626. 627. 628. 629. 630. 631. 632. 633. 634. 635. 636. 637. 638. 639. 640. 641. 642. 643. 644. 645. 646. 647. 648. 649. 650. 651. 652. 653. 654. 655. 656. 657. 658. 659. 660. 661. 662. 663. 664. 665. 666. 667. 668. 669. 670. 671. 672. 673. 674. 675. 676. 677. 678. 679. 680. 681. 682. 683. 684. 685. 686. 687. 688. 689. 690. 691. 692. 693. 694. 695. 696. 697. 698. 699. 700. 701. 702. 703. 704. 705. 706. 707. 708. 709. 710. 711. 712. 713. 714. 715. 716. 717. 718. 719. 720. 721. 722. 723. 724. 725. 726. 727. 728. 729. 730. 731. 732. 733. 734. 735. 736. 737. 738. 739. 740. 741. 742. 743. 744. 745. 746. 747. 748. 749. 750. 751. 752. 753. 754. 755. 756. 757. 758. 759. 760. 761. 762. 763. 764. 765. 766. 767. 768. 769. 770. 771. 772. 773. 774. 775. 776. 777. 778. 779. 780. 781. 782. 783. 784. 785. 786. 787. 788. 789. 790. 791. 792. 793. 794. 795. 796. 797. 798. 799. 800. 801. 802. 803. 804. 805. 806. 807. 808. 809. 810. 811. 812. 813. 814. 815. 816. 817. 818. 819. 820. 821. 822. 823. 824. 825. 826. 827. 828. 829. 830. 831. 832. 833. 834. 835. 836. 837. 838. 839. 840. 84

3) Réglage du seuil :

Ce montage devrait satisfaire aux conditions suivantes :

- Permettre, autant que possible, l'emploi des diodes en dehors des parties courbes de leur caractéristique.

On évite ainsi la réduction du niveau du signal, la détérioration de la bande passante et des distorsions. Ceci éliminait par contre, la possibilité d'effectuer son réglage par le choix du potentiel de grille des étages cathodynes (action sur les potentiomètres P). Ce montage ne permettant pas d'obtenir à la fois un fort débit des diodes et un seuil susceptible d'être réduit jusqu'à l'annulation.



- Utiliser l'amplificateur continu qui le suit à un même niveau d'entrée, quel que soit le seuil fixé.

Ainsi, aucune erreur n'est introduite par une éventuelle non-linéarité de cet étage d'amplification.

Le montage, conforme au schéma donné ci-dessus, n'est autre qu'un circuit sommateur, couramment utilisé dans les calculateurs analogiques.

Pour une entrée x , et une valeur E du potentiel au commutateur de seuil, déterminons la grandeur de sortie y . Nous négligerons pour ce calcul le courant de fuite de grille.

$$y = x + (E - x) \frac{R}{R + R'} = \frac{R'}{R + R'} x + \frac{R}{R + R'} E$$

Soit en posant

$$k = \frac{R'}{R + R'} \quad ; \quad a = \frac{R}{R + R'}$$

$$y = kx + aE$$

Le signal de sortie est donc la somme d'une grandeur proportionnelle à l'entrée et d'une constante dépendant de la tension E . Ainsi, en modifiant E , un niveau quelconque d'entrée peut être amené à une valeur convenue de sortie a (a = seuil de l'étage discriminateur). Pour ne pas trop réduire l'amplitude du signal traité, la valeur de k est choisie aussi voisine de l'unité que possible. Dans le cas du montage réalisé on a :

$$R = 100 \text{ K}, R' = 470 \text{ K et ,}$$

$$y = 0,825.x + 0,175.E$$

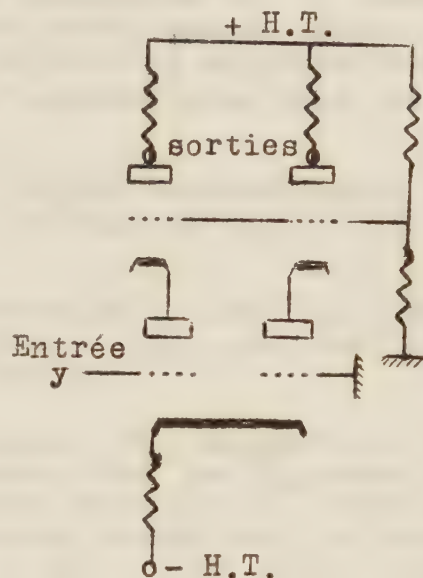
4) Etage amplificateur continu :

Comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, l'étage discriminateur utilisé n'est pas tout à fait idéal. Pour rendre insignifiante l'erreur qui lui est propre, une amplification continue a été intercalée.

Afin d'obtenir une stabilité suffisante sans avoir recours à des circuits complexes de stabilisation, nous avons utilisé :

- Un montage symétrique, donc peu sensible aux dérives.
- Une double triode à cathode unique (6 J 6), ce qui assure au mieux la symétrie de température des éléments respectifs des deux triodes.
- Des triodes pour remplacer les résistances de plaques.

On aboutit ainsi au montage différentiel de deux cascades représenté ici.



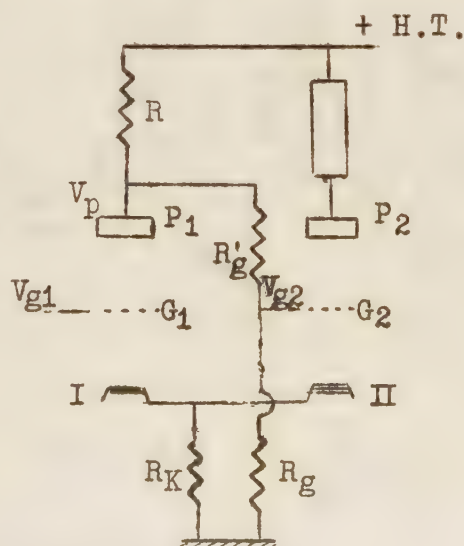
5) Etage de discrimination et d'intégration :

Les deux opérations de discrimination et d'intégration sont réalisées dans un même étage; un "trigger de SCHMITT". Son schéma de principe est rappelé ci-contre. Il peut être considéré comme un montage différentiel dans lequel un couplage continu entre la plaque de l'un des tubes et la grille de l'autre aurait été réalisé (liaison de P_1 à G_2 par la chaîne $R_g - R'_g$).

Voici, donnée rapidement, l'explication qualitative de son fonctionnement.

Supposons V_{g1} suffisamment positif pour que le tube I conduise seul. La tension V_{g2} , fixée par rapport au potentiel V_{p1} par la chaîne $R'_g - R_g$, vaut :

$$V_{g2} = \frac{R_g}{R_g + R'_g} V_{p1}$$



Si l'on fait décroître V_{g1} , il s'en suit une diminution de I_{p1} , d'où une augmentation de V_{p1} . V_{g2} , lié à V_{p1} , subit lui aussi un accroissement. Le potentiel de grille du tube I se rapproche ainsi de celui de la grille du tube II. Pour une valeur V_{II} de V_{g1} , le tube II commence à conduire. Par un choix convenable des éléments et en particulier de la résistance R , le système peut alors se bloquer dans un nouvel état où I n'est plus conducteur et II conduit. Cette position, stable tant que V_{g1} reste suffisamment faible, est caractérisée par la valeur constante $+E$ ($+H.T.$) du potentiel V_{p1} . La tension V_{g2} , donnée par l'expression rappelée plus haut, est également indépendante de V_{g1} .

$$V_{g2} = \frac{R_g}{R_g + R'_g + R} E \quad (\text{valeur nécessairement supérieure à } V_{II})$$

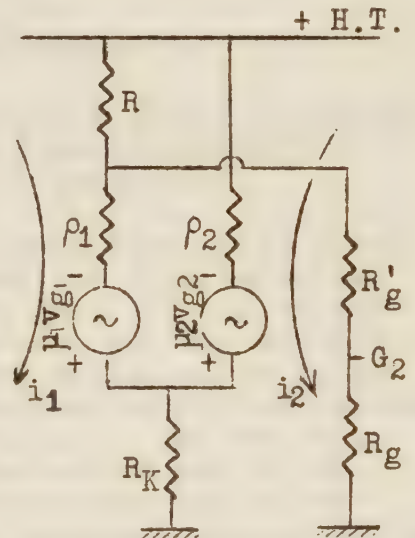
Dans cet état, le courant traversant le tube II, fixé par la valeur de la résistance R_k et le potentiel V_{g2} , est donc constant quelle que soit la valeur de l'entrée V_{g1} .

Regardons ce qu'il advient lorsque, V_{g1} augmentant, il redevient supérieur à V_{II} . Rien ne se produit tant que V_{g1} reste inférieure à une valeur $V_I > V_{II}$ qui, pour la tension actuelle des cathodes, permet le déblocage du tube I. En redevenant conducteur, il entraîne une diminution de V_{p1} , donc de V_{g2} ce qui a pour effet de bloquer le tube II. On se trouve ramené à l'état initial.

Le fonctionnement du trigger peut également être déduit de la remarque suivante :

- le montage n'est autre qu'un amplificateur continu dans lequel a été introduit une réaction (continue) positive, qui, compte tenu de la valeur des éléments, est supérieure à l'unité.

Le calcul suivant va confirmer cette remarque. Déterminons la réponse i_2 du circuit. Pour cela nous allons écrire et résoudre le système des équations de maille du schéma équivalent au trigger.



$$\mu_1 V_{g1} = R_k (i_1 + i_2) + (R + \rho_1) i_1,$$

$$\mu_2 V_{g2} = R_k (i_1 + i_2) + \rho_2 i_2$$

Or
$$V_{g2} = \frac{R_g}{R_g + R'_g} V_{p1} = - \frac{R_g}{R_g + R'_g} R i_1 = - K R i_1 \text{ avec } K = \frac{R_g}{R_g + R'_g}$$

Eliminant i_1 et V_{g2} entre ces trois équations il vient :

$$\mu_1 V_{g1} = \frac{\mu_2 K R R_k - R R_k - R_k (\rho_1 + \rho_2) - R \rho_2 - \rho_1 \rho_2}{R_k + \mu_2 K R} i_2$$

Le numérateur de la fraction, négatif lorsque K ou R est nul, décroît lorsque le produit $\mu_2 KR$ augmente. Il peut même s'annuler pour une valeur suffisante de son premier terme.

En admettant les deux tubes identiques, cette éventualité se produit pour la valeur :

$$\mu K = 1 + \frac{2\rho}{R} + \frac{\rho}{Rk} \quad (1 + \rho/R)$$

Elle correspond précisément à un taux de réaction égal à l'unité.

Bien entendu ce calcul ne renseigne pas sur les niveaux des deux états, pas plus qu'il ne rend compte de l'écart des deux seuils de déclenchement. En effet, le schéma équivalent ne s'applique qu'aux variations de potentiel indépendamment des niveaux continus moyens. De plus, il suppose aussi la linéarité des éléments et en particulier des tubes, ce qui ne saurait être le cas pour des explorations de grille conduisant jusqu'au "cutt-off".

En définitive, si l'on suppose confondus en V les deux seuils VI et VII du trigger (écart réduit artificiellement par l'adjonction de l'étage amplificateur continu décrit plus haut) et si l'on considère le courant plaque du tube II comme sortie, le trigger se comporte comme un comparateur. Il donne pour réponse :

- une intensité constante i tant que V_{g1} est inférieur au seuil V,
- une intensité nulle quand V_{g1} est supérieur à V.

Par cet étage, la mesure du temps, pendant lequel la tension d'entrée est inférieure au seuil, est ramenée à la détermination d'une quantité d'électricité it (puisque $i = \text{constante}$).

L'emploi d'une capacité ayant été retenu pour cette mesure de quantité d'électricité, et celle-ci nécessitant l'introduction d'un condensateur C dans le circuit plaque du tube II* Les variations de charge de la capacité, qui se traduisent par une modification de la tension de plaque du tube II, n'ont ainsi pas de répercussion sur la valeur des seuils du trigger. Cette condition de fonctionnement ne pouvait être obtenue avec des triodes. En réalité, afin de conserver au montage sa symétrie, deux penthodes EF 184 sont utilisées. Leur forte pente et leur coupure franche les ont fait retenir. Ces deux caractéristiques leur assurant une excursion grille réduite pour passer du débit normal au cutt-off sont en effet favorables à la diminution de l'écart des seuils du trigger.

* la triode II a été remplacée par une penthode.

Les autres éléments, et en particulier la valeur de la résistance R, ont été déterminés pour obtenir des seuils aussi voisins que possible, tout en conservant au montage un temps de basculement très court.

6) Mesure proprement dite, comptage :

Voici d'abord un bref aperçu des principaux dispositifs susceptibles de convenir à cette mesure.

- Détermination de la valeur moyenne de l'intensité plaque traversant le tube II. Celle-ci peut être obtenue à l'aide d'un milliampèremètre à cadre.

$$\bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = i \cdot \frac{t}{T} = i \cdot \gamma \quad i = f(t) = 0 \text{ ou } 1$$

Ce procédé très simple, ne convient pas cependant aux signaux trop lents.

Il peut être utilisé :

- avec des grandeurs périodiques, dès que leur fréquence dépasse suffisamment la fréquence propre de l'équipage de mesure.
- avec des phénomènes aléatoires, lorsque le temps d'échantillonnage leur convenant reste de l'ordre de grandeur ou inférieur à la période propre du milliampèremètre.
- Détermination de la quantité d'électricité it . Cette mesure peut se faire :
 - à l'aide d'un moteur entraînant un intégrateur mécanique (procédé analogue à la mesure d'énergie : compteur).
 - à l'aide d'un intégrateur chimique
 - à l'aide d'un condensateur.

Dans ce dernier cas, deux solutions sont envisageables :

1. l'introduction d'une capacité importante dans le circuit plaque du tube II du trigger. Cette capacité, déchargée avant la mesure, emmagasinerait les quantités d'électricité qui lui seraient fournies pendant la durée d'étude. En fin de manipulation, sa charge serait déterminée par la lecture de la différence de potentiel existant entre ses armatures.

2. l'emploi d'une capacité moins importante, qui sera systématiquement déchargée dès que la tension à ses bornes atteindra une valeur donnée. La mesure de la quantité d'électricité, donc du temps ou de l'intermittence, revient alors à compter le nombre de décharges obtenues en un temps donné.

C'est ce dernier procédé qui a été retenu pour cet appareil destiné à des mesures d'intermittence. Il permet en effet une grande souplesse dans le choix du temps d'observation, et convient parfaitement aux durées de mesure même très longues (la durée de mesure n'est limitée que par la capacité du compteur utilisé).

Comme on peut le voir sur le schéma ci-contre, le condensateur est déchargé par un thyatron. Le potentiel de sa cathode, reliée à la plaque P₂ du trigger, diminue au fur et à mesure que la charge du condensateur augmente. La grille étant à un potentiel fixe, il s'en suit une augmentation, relative à la cathode, de sa tension qui finit par provoquer l'amorçage. Le tube à gaz établit alors un court-circuit entre les armatures du condensateur dont la différence de potentiel est rapidement ramenée à la tension de désionisation.

Les résistances R_p et R_d sont destinées respectivement à limiter le courant grille après amorçage et la pointe d'intensité de décharge. Ces deux limitations sont prescrites par le constructeur pour conserver au tube une durée de vie normale.

Le thyatron à hélium EC 50, a été choisi pour son temps réduit de désionisation. Le nombre maximal de décharges qui dépend à la fois :

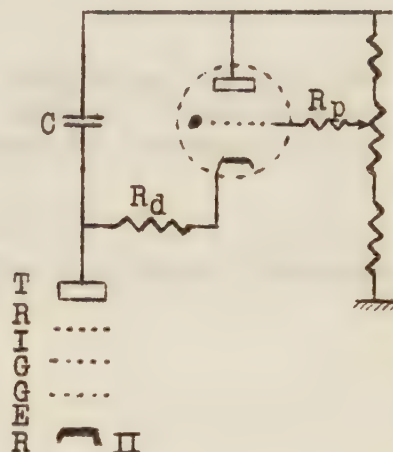
- de l'intensité de charge (courant i traversant le tube II)
- de l'importance de la capacité C
- de la valeur de la différence de potentiel maximale admise à ses bornes,

a été fixé à environ 200 par seconde. L'ajustage fin est possible à l'aide du potentiomètre fixant la tension grille.

Ce choix devait tenir compte des exigences contradictoires suivantes :

- Obtention d'une précision suffisante pour les mesures de courtes durées (1/2 % pour une seconde).
- Réduction relative du temps de désionisation par rapport au temps de mesure.

Ce temps, contrôlé à l'oscilloscope, ne représente pas, compte tenu du temps de décharge, les 2 centièmes de la durée de mesure. L'erreur introduite par eux est donc nécessairement inférieure à cette valeur. Elle est en moyenne beaucoup plus faible encore, comme nous allons le voir.



Précision de la mesure :

Contrairement au comptage discret, l'intégration continue proprement dite réalisée dans cet appareil, n'introduit aucune erreur. Par contre, le dispositif de décharge que nous venons de décrire, dont l'action ne peut être instantanée, introduit une petite incertitude que nous allons chiffrer.

- Soit T la durée d'une mesure.

- Soit T' le temps maximal représenté par les décharges et les désionisations pour le même temps de mesure, c'est-à-dire le temps occupé par celles-ci lorsque le condensateur est chargé d'une façon continue.

La durée réelle de mesure est en fait :

- Dans le cas de l'étalonnage, le tube II du trigger étant constamment conducteur

$$T - T'$$

- Pour une mesure d'intermittence vraie γ ,

$$T - \gamma T'$$

La différence des temps de mesure est par conséquent,

$$T - \gamma T' - (T - T') = (1 - \gamma) T'$$

$$\text{Celle des temps d'intégration : } (1 - \gamma) T'$$

qui ramenée au temps d'intégration théorique, donne :

$$\varepsilon_r = \frac{\gamma (1 - \gamma) T'}{\gamma T} = (1 - \gamma) \frac{T'}{T}$$

C'est l'erreur moyenne relative de mesure, dans le cas d'un signal aléatoire. Elle est nulle pour $\gamma = 1$, maximale et égale à $T'/T = 0,02$ soit 2% dans le cas particulier où $\gamma = 0$ (pour les valeurs faibles de γ).

L'erreur absolue vaut :

$$(1 - \gamma) \frac{T'}{T}$$

et passe par un maximum $0,25 T'/T = 0,005$ pour $\gamma = 0,5$.

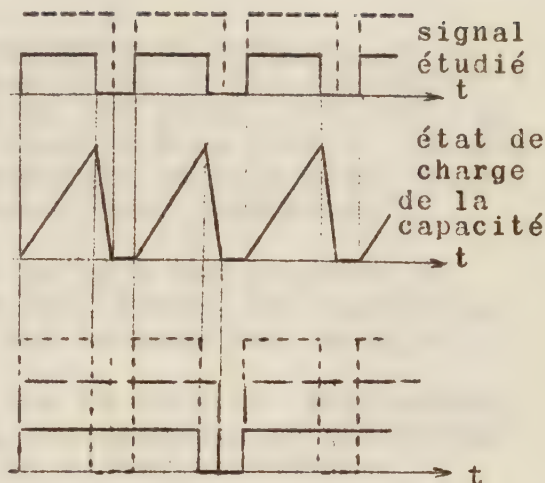
Dans le cas d'un signal périodique de fréquence non-harmoniques de la succession des décharges, l'erreur est inchangée si le temps de mesure est suffisamment grand par rapport à la période du phénomène.

Pour la fréquence N justement égale à celle des décharges, une erreur de 2% peut être obtenue avec une probabilité de 0,02 (même dans le cas où $\gamma = 1$).

Cette éventualité se produit quand toutes les décharges s'effectuent exactement pendant le court instant où le signal ne doit pas être compté.

Les fréquences multiples kN et sous-multiples N/k , donnent lieu à une incertitude de $2/k\%$ avec la même probabilité 0,02.

Les croquis ci-contre représentent deux des éventualités mentionnées ci-dessus.



=== signaux donnant le même résultat.

Nous mentionnerons plus tard (page 28) une autre cause d'erreur qui ne fait pas, à proprement parler, partie de la mesure dont il est question ici. Elle est liée au temps de réponse du trigger, et ne devient appréciable que pour les fréquences élevées.

Pour terminer, signalons qu'en plus d'une adaptation facile à des durées de mesure variées, la solution de mesure retenue possède les avantages suivants :

- Elle ne nécessite pas l'emploi de compteurs de grandes performances puisque la fréquence maximale des impulsions destinées au comptage est faible (inférieure à 200 par seconde).
- La capacité du compteur nécessaire est relativement peu élevée. Une mesure s'étendant sur 50 secondes, enregistrera au maximum 10.000 impulsions (contre 275.000 avec le montage de JOHNSON).

Remarque concernant la correction de l'effet de seuil.

Etant donné les inconvénients de la bascule de correction et l'impossibilité où l'on se trouve d'en justifier le type, nous proposons de déterminer l'intermittence vraie à partir d'une extrapolation. Dans ce but, plusieurs mesures seront faites avec des seuils différents et supérieurs aux fluctuations parasites.

Remarquons qu'une telle correction était assez incertaine avec le montage précédent, puisque la valeur du seuil n'était pas connue de façon précise.

Schéma :

Le schéma d'ensemble de l'appareil proposé est donné dans la planche (3) où sont également portées, en regard des montages élémentaires, les fonctions remplies par chacun d'eux.

AUTRES POSSIBILITES DE L'APPAREIL

La grande rapidité de fonctionnement du trigger, et la finesse de la mesure proprement dite, consistant en une véritable intégration de la réponse de celui-ci, nous ont permis d'étendre le domaine d'application de l'appareil qui vient d'être décrit. De très légères modifications vont ainsi nous permettre de l'utiliser à des mesures de probabilités cumulées et de densités de probabilité.

La première donne la probabilité qu'a une grandeur, de dépasser ou de rester inférieure à une valeur fixée. Sa représentation en fonction de la grandeur étudiée est la fonction de répartition.

La densité de probabilité en est la dérivée. Elle chiffre donc l'importance de la probabilité qu'a une grandeur de se trouver dans un intervalle très petit encadrant la valeur considérée.

Mesures de probabilités cumulées :

L'existence d'un seuil dans l'appareil rend à peu près immédiate la détermination de probabilités cumulées. Le signal est dans ce cas, directement appliqué à l'étage fixant le seuil (sans redressement bien entendu). Ainsi, l'étude de la réponse d'un anémomètre pourra fournir la fonction de répartition des vitesses du fluide.

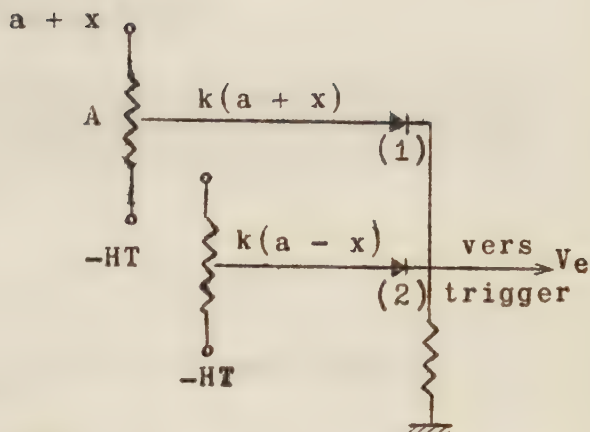
Toutefois ces mesures ne représenteront véritablement des vitesses que si l'on utilise une chaîne d'amplification continue. Elles restent cependant utilisables avec une chaîne anémométrique alternative si sa fréquence de coupure inférieure est suffisamment faible et la réponse du fil linéarisée (encore faut-il, dans ce cas pour obtenir un résultat complet, effectuer une mesure de la vitesse moyenne). Dans le cas contraire, la restitution des vitesses ne s'obtiendra qu'à partir d'un calcul par approximations successives, à condition bien sûr de connaître la courbe d'étalonnage du fil utilisé.

Mesures de densités de probabilité :

Elle s'obtient en réalisant l'addition des intervalles de temps pendant lequel le signal est compris entre deux valeurs données suffisamment voisines. Pratiquement il suffit de dédoubler le seuil. Cette opération est réalisée avec le circuit à diodes représenté page suivante.

Il s'agit d'un montage logique très simple réalisant une réunion ou une intersection selon la polarité choisie pour la représentation des informations.

V_e étant la tension appliquée au trigger,
 a sa tension de seuil qui est aussi le niveau continu moyen de sortie de l'étage amplificateur,
 $a + x$ la valeur instantanée de l'une de ses sorties,
 $a - x$ la sortie symétrique de la précédente.



Les points A et B sont tels que :

$$V_A = k(a + x) \quad ; \quad V_B = k(a - x) \quad ; \quad (0 < k < 1)$$

Déterminons le temps pendant lequel il y a intégration, c'est-à-dire satisfaisant la condition $V_e \leq a$. Elle s'écrit, en utilisant le vocabulaire de la logique des circuits et se référant à une logique négative :

$$oa \cap [k(a + x) \cap k(a - x)]$$

soit $(oa \cap ka + kx) \cap (oa \cap ka - kx)$

Correspondant à :

$$ka + kx \leq a \quad \text{et} \quad ka - kx \leq a$$

Inéquations qui donnent respectivement :

$$x \leq \frac{1 - k}{k} a \quad \text{et} \quad x \leq -\frac{1 - k}{k} a$$

d'où pour l'entrée la condition :

$$a - a \frac{1 - k}{k} \leq x \leq \frac{1 - k}{k} a + a$$

On parvient au même résultat en remarquant qu'étant donné le montage des diodes (1) et (2), le potentiel de T, V_e , est fixé par celui des points, A ou B, qui est au niveau le plus élevé. La double inégalité s'obtient en écrivant que V_e n'est inférieur à a que si V_A et V_B sont simultanément inférieurs à cette valeur.

La grandeur étudiée est en définitive prise en considération à travers une fenêtre de largeur:

$$\frac{1 - k}{k} 2a$$

Nous allons déterminer l'effet de cette largeur sur la précision des mesures effectuées.

Erreur due à la largeur Δx de la fenêtre d'étude :

Pour ce calcul, nous supposons que le phénomène étudié suit une loi gaussienne que nous prendrons, pour des raisons de simplicité, sous sa forme réduite. La densité réelle pour la valeur x_0 de la variable réduite x est alors :

$$d(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x_0^2/2}$$

La mesure, qui fournit en réalité la valeur moyenne sur un intervalle Δx centré en x_0 , donne :

$$d'(x_0) = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_0 - \frac{\Delta x}{2}}^{x_0 + \frac{\Delta x}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx$$

Soit en développant en série, et se limitant aux termes du second ordre :

$$d'(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x_0^2/2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x_0^2/2} (x_0^2 - 1) \frac{\Delta x^2}{24}$$

D'où la différence

$$d'(x_0) - d(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x_0^2/2} (x_0^2 - 1) \frac{\Delta x^2}{24}$$

et l'erreur relative sur la densité :

$$\frac{d'(x_0) - d(x_0)}{d(x_0)} = \frac{x_0^2 - 1}{24} \Delta x^2$$

Elle a deux maximums :

- le premier pour $x = 0$
- le second pour $x \rightarrow \infty$

En fait, on ne s'intéressera pas au cas très rare, et n'ayant que peu de signification physique, où les valeurs de x sont en module supérieures à 3.

Cette éventualité ne représente qu'une probabilité totale de 1% pour une loi normale.

La valeur de Δx , qui est susceptible d'être modifiée par la réduction de k , a été choisie pour obtenir une précision de l'ordre du centième dans les limites précédemment introduites ($-3 < x < +3$).

Ainsi pour $\Delta x = 0,14$, soit pour une fenêtre couvrant environ le quarantième de l'amplitude limite adoptée, l'erreur vaut :

- 0,7 % pour $x = 3$

- 0,1 % pour $x = 0$

Cette erreur ne tient compte que de la largeur Δx de la fenêtre d'étude, et suppose en particulier un fonctionnement idéal du trigger. Une application numérique simple va nous montrer qu'il ne peut en être ainsi quelle que soit la fréquence des signaux analysés.

Supposons en effet qu'un signal sinusoïdal de fréquence 10 KHz soit étudié. Le temps minimal devant être enregistré est, dans les conditions fixées plus haut ;

$$\sin \theta = \frac{h/43}{h} = \sin \frac{\omega t}{2} = 0,023$$

L'angle restant faible, on peut confondre le sinus avec la valeur de l'angle exprimé en radian, d'où :

$$t = 0,74 \mu s$$

Les intervalles élémentaires mesurés sont donc de l'ordre de la μs .

- Une précision du centième paraît ainsi dépendre de la possibilité de réaliser un trigger ayant un temps de basculement de quelques nano-secondes. Fort heureusement, en pratique, les flancs de l'impulsion du trigger étant approximativement complémentaires, une compensation partielle du temps de basculement se produit.

- Une précision très acceptable peut ainsi être atteinte malgré un temps de commutation beaucoup plus élevé.

Le croquis ci-contre, schématisant une impulsion recueillie sur la plaque du trigger, montre comment par intégration dans le condensateur, une compensation en résulte.



VERSION TRANSISTORISEE

Cette version étant à peu près la transposition du montage à tube décrit précédemment, nous nous contenterons de donner ici la nomenclature et le rôle de chacun des éléments constituant cette adaptation aux transistors.

- la résistance de 50 K, disposée à l'entrée, est destinée à limiter le courant de charge de la capacité C lors du branchement de l'appareil à la sortie de la chaîne anémométrique (potentiel continu de 130 V environ).
- les deux diodes D₁ et D₄, situées à l'extérieur du montage écréteur, compensent la dissymétrie de charge du condensateur à travers les deux diodes D₂ et D₃. Ces éléments devraient être appariés.
- les transistors OC 75, fournissent les potentiels intermédiaires entre 0 et - 18 V nécessaires au dispositif d'écrétage. Ils remplacent un diviseur potentiométrique à sorties relativement stables en fonction du débit, bien que n'en exigeant pas la consommation.
- les étages à charge d'émetteur attaquant l'amplificateur continu, permettent d'éviter une diminution importante du gain dans la résistance de 10 K nécessaire à la limitation de l'intensité dans les diodes d'écrétage. Ils présentent en outre l'avantage d'avoir un courant de fuite de base à peu près constant. Ce courant, qui tend à charger C₁, entraînerait s'il était variable, la modification de la différence de potentiel entre les armatures de C₁.
- l'amplificateur différentiel est amélioré par une alimentation à courant constant des émetteurs. Celle-ci est également utilisée pour corriger la symétrie des sorties.
- des étages à charge d'émetteur recopient les sorties de cet amplificateur continu. Ils ont pour unique but de permettre l'attaque de l'étage suivant sous faible impédance.
- le dispositif de dédoublement du seuil est, aux polarités près, identique à celui précédemment décrit.
- le trigger de SCHMITT, réalisant la discrimination et l'intégration, utilise deux transistors NPN au silicium. Ceux-ci présentent l'avantage :
 - de n'avoir pratiquement pas de courant inverse,
 - de mettre à profit le déplacement du niveau continu introduit par les transistors PNP qui précèdent.
- La diode, intercalée dans la base d'entrée du trigger, est destinée à limiter les risques de claquage du 2 N 338 par le courant inverse.

- La lecture du niveau de charge de la capacité C est rendue possible, sans perturbations, par un double étage d'adaptation. Sa grande impédance d'entrée, rend négligeable le courant parasite de mesure.
- Le dispositif de décharge, qui pourrait utiliser un thyatron au silicium, a été constitué par un montage plus complexe. Il a l'avantage d'être symétrique et par conséquent, moins sensible aux dérives. Il comprend un trigger dont les deux seuils sont volontairement différents. Cette condition s'obtient facilement en choisissant convenablement la charge de collecteur du premier transistor I. Cette résistance de charge, variable, permet le réglage du nombre maximal des décharges ($F = I$).

Le fonctionnement de ce dispositif de décharge est le suivant :

Supposons le condensateur C en début de charge. Le potentiel de la base de I est peu négatif et le transistor II conduit. La chute de tension dans sa résistance de collecteur (1,8 K), assure la conduction du transistor NPN_2 N 338 qui suit.

Le point E est ainsi suffisamment négatif pour que le transistor 2 N 697 soit maintenu bloqué quel que soit l'état de charge de C tant que le trigger n'a pas basculé. Par son changement d'état (I devenant conducteur), le point E est pratiquement ramené au potentiel 0, et le transistor 2 N 697 de décharge conduit. Ce nouvel état n'est supprimé que par le retour du trigger à sa position initiale. Elle résulte de l'augmentation de la polarisation de la base de I, à la suite de la décharge de C.

REMARQUES :

- 1 - Les transistors 2 N 338 du trigger de discrimination et d'intégration seraient avantageusement remplacés par des 2 N 1340, dont la fréquence de coupure est plus élevée.
- 2 - La durée de décharge pourrait être réduite par le remplacement du transistor 2 N 697 par un autre type admettant un courant de pointe plus élevé.
- 3 - Bien qu'un montage approprié puisse assurer la compensation du courant de fuite d'un élément PNP, il reste plus pratique d'utiliser un transistor NPN pour assurer la décharge de la capacité C.

CHAPITRE 3

CONTROLE ET MESURES

CONTROLE DU FONCTIONNEMENT DE L'APPAREIL

Sans vouloir en négliger l'importance, nous passerons sous silence un certain nombre de contrôles très courants et ne se rapportant pas directement aux mesures. Ce sont :

- La détermination de la bande passante des différents étages de l'appareil.
- L'étude du gain et de la dérive de l'étage amplificateur continu.

Voici donc les autres vérifications qui ont été effectuées sur cet appareil.

Contrôle de la validité du système de mesure :

Cette vérification comprend :

- la détermination de la variation dans le temps de la fréquence des impulsions recueillies pour un courant constant de charge du condensateur C (trigger toujours dans l'état II conducteur),
- l'étude de l'influence du fonctionnement du thyatron sur ce nombre de décharges. Il s'agit surtout de vérifier que la tension d'allumage du tube à gaz n'est pas trop modifiée par la fréquence de son intervention. L'énergie fournie à la cathode par le bombardement ionique de celle-ci, pouvait en effet se traduire par une variation de sa température de surface.

Pour ce contrôle, l'étalonnage $F = 1$ a été réalisé successivement après 10 minutes de mise en service ou de court-circuit du thyatron.

Ces deux essais ont montré que les écarts étaient inférieurs à 0,5 %.

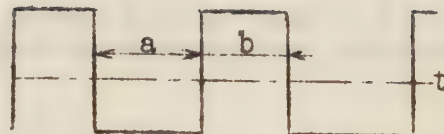
Remarque :

L'alimentation filament du tube de décharge était alors fournie par un régulateur de tension alternative "Réguvolt".

Contrôle du fonctionnement du trigger :

Le dispositif de décharge ayant déjà été éprouvé, nous l'avons utilisé pour le contrôle du trigger.

Cette vérification consiste principalement en l'introduction dans l'étage de discrimination et d'intégration d'un signal rectangulaire de largeur réglable. Celui-ci, fourni par un générateur Philips (GM 2314), simule une intermittence $\gamma = a/a + b$, contrôlée par observation directe à l'oscilloscope.



Ces essais ont été réalisés aux fréquences 20, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 8000 Hz, et pour des intermittences de 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,9 - 1. (voir planche 4)

Les écarts observés, inférieurs aux erreurs d'appréciation de la valeur de l'intermittence simulée, n'ont pas permis de mettre en évidence une erreur systématique du dispositif de mesure.

Contrôle du fonctionnement en mesure d'intermittence :

La mesure d'intermittence n'étant en réalité que la détermination d'une probabilité cumulée sur un signal préalablement redressé, la vérification de cette possibilité a été limitée au contrôle du fonctionnement correct des deux premiers étages, et en particulier de leur symétrie.

Contrôle du fonctionnement en probabilité cumulée :

Il a d'abord été effectué avec un signal en "dent de scie" fourni par un générateur "Hewlett-Packard".

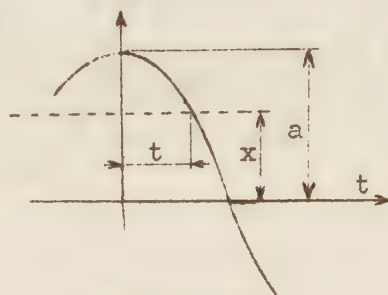
La courbe théorique de probabilité cumulée en fonction du seuil est une droite. Ce générateur ne permettant pas de travailler à plus de 1.000 Hz, la vérification a dû être poursuivie avec un signal sinusoïdal aux fréquences de : 5 000 et 15 000 Hz.

La réponse théorique est dans ce cas, une fonction circulaire réciproque. En effet, pour un seuil x , sur une sinusoïde d'amplitude a , la probabilité cumulée vaut :

$$P = \frac{2t}{T} = \frac{2 \arccos x/a}{2\pi}$$

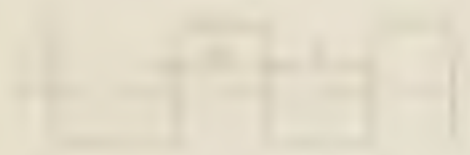
$$= \frac{1}{\pi} \arccos \frac{x}{a}$$

Les résultats expérimentaux et théoriques de cette étude sont rassemblés dans les courbes de la planche (5).



Période T

1. La détermination de la courbe de la fonction $f(x)$ est effectuée par la méthode des moindres carrés. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.



Les données expérimentales sont les suivantes :

La courbe de la fonction $f(x)$ est représentée sur la figure ci-dessous.

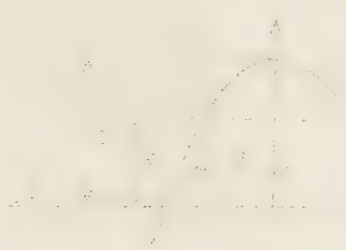
2. La détermination de la courbe de la fonction $f(x)$

La courbe de la fonction $f(x)$ est représentée sur la figure ci-dessous. Les données expérimentales sont les suivantes :

La courbe de la fonction $f(x)$ est représentée sur la figure ci-dessous. Les données expérimentales sont les suivantes :

La courbe de la fonction $f(x)$ est représentée sur la figure ci-dessous. Les données expérimentales sont les suivantes :

La courbe de la fonction $f(x)$ est représentée sur la figure ci-dessous. Les données expérimentales sont les suivantes :



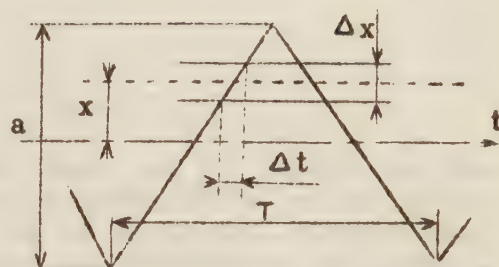
$$\begin{aligned}
 f(x) &= \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}x \\
 f'(x) &= x + \frac{1}{2} \\
 f''(x) &= 1
 \end{aligned}$$

La courbe de la fonction $f(x)$ est représentée sur la figure ci-dessous. Les données expérimentales sont les suivantes :

Contrôle du fonctionnement en densité de probabilité

Pour les fréquences inférieures à 1 000 Hz, un signal en "dent de scie" a également été utilisé, et les vérifications suivantes réalisées :

- Pour une amplitude constante de la dent de scie, détermination de la densité en fonction du seuil et de la fréquence. L'expérience vérifie parfaitement la théorie, la densité est trouvée indépendante de ces deux paramètres.



- Pour un seuil quelconque, étude de la densité en fonction de l'amplitude du signal. La variation de celle-ci correspondant à une variation inverse de la largeur de la fenêtre d'étude. La réponse obtenue est inversement proportionnelle à l'amplitude, comme le prévoit le calcul :

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{a} \cdot \frac{T}{2} \quad \text{d'où} \quad d = \frac{K}{a}$$

Enfin, pour la même raison que précédemment, ce contrôle a été repris avec un signal sinusoïdal et prolongé pour des fréquences plus élevées.

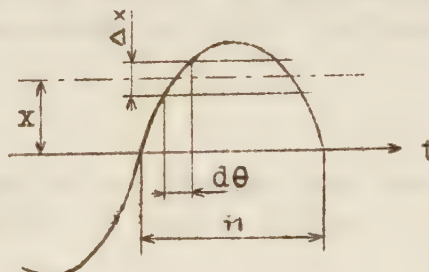
La densité est alors :

$$d = \frac{d\theta}{\pi} = \frac{d(\arccos x/a)}{\pi} = \frac{dx}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}}$$

Soit en ramenant cette densité à la valeur prise pour $x = 0$

$$d = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}}$$

La planche (5) donne les résultats de ces différents essais.



MESURES

Les mesures dont il va être question ont été effectuées au cours des années 1962 - 1963 au laboratoire de Mécanique des fluides de l'Ecole Centrale de LYON.

Matériel utilisé :

Jet

Toutes les mesures ont été faites dans un jet d'air se développant en atmosphère libre. La presque totalité d'entre elles utilisèrent une buse à section carrée de 12×12 Cm². Cette soufflerie présentait l'avantage de posséder un dispositif de chauffage rendant possible des mesures d'intermittence thermique. Quelques essais ont également été effectués dans un jet rond pour se replacer dans des conditions expérimentales plus voisines de celles de CORRISIN.

Anémomètre

Il s'agit d'un anémomètre à fil chaud à intensité constante.

La sonde est constituée par un fil de WOLLASTON chauffé par un courant constant. Le signal recueilli à ses extrémités est amplifié par une chaîne à faible bruit, spécialement étudiée par M. Michel AILLOUD et réalisée par la Maison TACUSSEL.

Filtres

Les essais de filtrage ont été réalisés à l'aide d'un filtre passe-haut, passe-bas et passe-bande HTP 8078 de la maison WANDEL et GOLTERMANN. Il a été choisi pour sa coupure à forte pente (40 dB par octave). Les fréquences de coupures supérieures et inférieures sont sélectionnées, dans une suite de valeurs en progression géométrique, par deux commutateurs à plots indépendants.

Appareil de mesure

Toutes les mesures d'intermittence et de probabilité ont été faites avec l'appareil décrit au début de cette étude.

Compteur

Bien que de performances très supérieures à celles strictement nécessaires à de telles mesures, nous avons utilisé pour le comptage, le fréquencemètre-chronomètre "ROCHAR" type A 477.

Condition des mesures

- la sonde est placée dans un plan de symétrie du jet à environ 1,20 m de la buse.
- la vitesse moyenne quadratique maximale (relevée au Pitot, au centre du jet) est généralement, pour les sections étudiées, voisine de 14 m/s. Cette mesure qui n'est pas indispensable à de nombreux essais, n'est pas faite de façon systématique.
- les diamètres de fil utilisés sont de 3,5 et 1 μ , et ne nécessitent donc qu'une très faible correction d'inertie thermique. Le bruit de la chaîne est ainsi insignifiant.
- le coefficient de surchauffe des fils anémométriques varie de 1,7 à 2 environ.
- les mesures sont généralement moyennées sur 50 ou 100 secondes, en effectuant 5 ou 10 mesures de 10 secondes en chaque point. La base de temps la plus longue du compteur, n'est en effet que de 10 secondes.

Les mesures suivantes ont été réalisées :

- Mesures d'intermittence en introduisant successivement une discrimination d'amplitude puis de fréquence.
- Mesure d'intermittence thermique dans un jet chaud.
- Relevé de probabilités cumulées de vitesse.
- Relevés de densités de probabilité de vitesse.

Mesures d'intermittence.

Comme nous l'avons déjà signalé, les mesures d'intermittence ont pratiquement toujours fait appel à un double réglage du seuil et de sa correction par appréciation directe de la réponse de l'appareil.

Désirant expliciter le critère finalement utilisé pour cette mise au point visuelle, nous avons entrepris l'étude systématique des variations de l'intermittence en fonction du seuil. Elle fournit des courbes à décroissance continue comme on peut le voir dans les graphiques de la planche 6. Aucune discontinuité ou anomalie n'est observable sur ces courbes. Des tracés absolument analogues sont obtenus à partir du signal anémométrique dérivé. Pour cette raison, ils n'ont pas été reproduits ici.

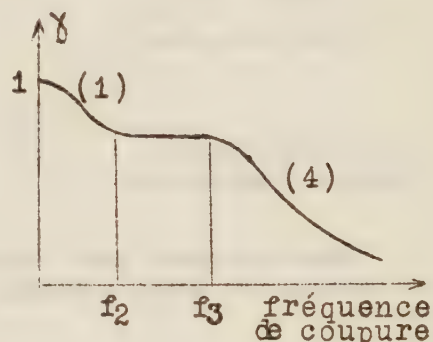
Ces résultats négatifs, semblent de plus mettre en défaut le principe même de la mesure. En effet, l'existence des fluctuations de vitesse est considérée comme un critère caractéristique de la turbulence. Pensant que la fréquence du phénomène pouvait aussi être implicitement utilisée lors des réglages à vue, nous avons essayé d'introduire un critère de fréquence. D'ailleurs, les fluctuations recueillies à l'extérieur du jet semblent essentiellement constituées de basses fréquences. Cette distinction, suggérée déjà par une remarque de CORRSIN et KISTLER, est probablement aussi à l'origine de la préférence généralement accordée au signal dérivé pour les mesures d'intermittence. Nous avons donc effectué des relevés de γ en fonction d'un seuil de fréquence. En supposant que les spectres des deux types d'écoulements ne se recoupent pas, la courbe de l'intermittence devrait présenter l'allure donnée sur le graphique.

- La zone (1) représente une bande de fréquence qui ne se trouve qu'à l'extérieur du jet. Dans cette région, l'augmentation de la fréquence de coupure entraîne la diminution de γ par suite de la disparition progressive des signaux non-turbulents.

- La fréquence f_2 marque la limite supérieure du spectre des fluctuations parasites induites à l'extérieur du jet.

- La fréquence f_3 est la limite inférieure du spectre de la turbulence dans la région étudiée. La courbe présente un palier si $f_3 > f_2$.

- La branche (4) de la courbe correspond à la disparition des fréquences de la turbulence, coupées peu à peu par le filtre.



f_3 : fréquence la plus basse des fluctuations turbulentes

f_2 : fréquence la plus élevée des fluctuations de vitesse induites à l'extérieur du jet.

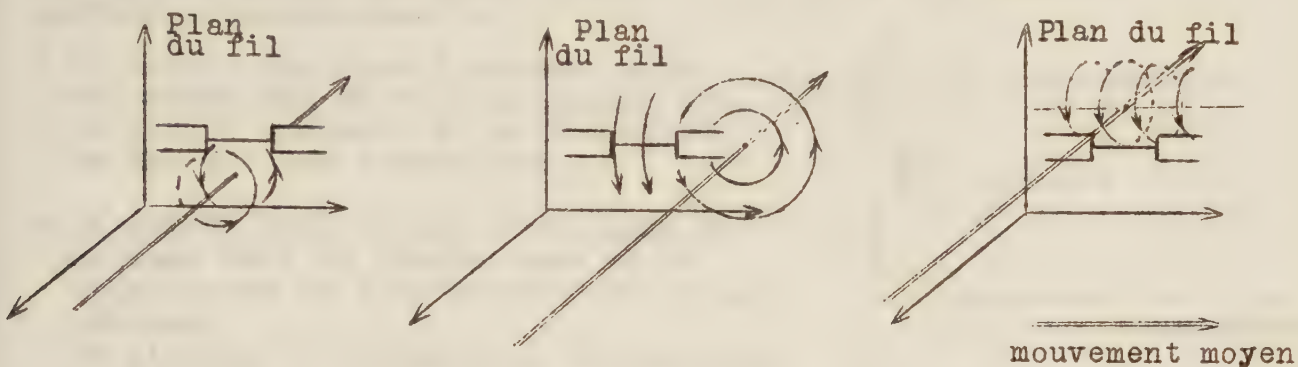
Les courbes expérimentales obtenues (planche (6)), qui n'accusent pas de palier, semblent indiquer que le spectre des fréquences parasites recueillies à l'extérieur du jet, recouvre au moins partiellement celui de la turbulence.

Voici des interprétations possibles de ces résultats quelque peu surprenants :

- Pour expliquer la continuité des courbes de l'intermittence en fonction du niveau de seuil, il suffit de tenir compte de l'inégalité d'amplitude des fluctuations enregistrées dans une même bouffée turbulente. Celle-ci résulte tout simplement des orientations ou des positions différentes que peut prendre un tourbillon par rapport à la sonde et à la direction de l'écoulement moyen.

Ainsi, les tourbillons donnant naissance à une vitesse relative parallèle au fil, ne modifient pas du tout sa température, et aucun signal ne lui correspond. De même, les tourbillons donnant lieu à une vitesse à la fois perpendiculaire au fil et au déplacement moyen du fluide, ne donnent qu'une réponse insignifiante. Par contre, ceux qui possèdent des vitesses parallèles (de même sens ou de sens contraire) à la vitesse d'entraînement donnent une réponse maximale.

Les schémas ci-dessous représentent ces trois cas typiques.



Notons qu'une sonde à 4 fils uniquement sensible aux tourbillons sera elle aussi, par suite de ses dimensions mêmes, plus ou moins influencée par eux.

- Il n'est pas interdit non plus de penser qu'une différence existant entre les vitesses moyennes à l'extérieur et à l'intérieur du jet intervienne également. Ceci semblerait d'ailleurs confirmé par des oscillogrammes enregistrés en repoussant aussi loin que possible la fréquence de coupure inférieure de la chaîne d'amplification. Cette différence, qui donne lieu à des raccords exponentiels quand on utilise des liaisons alternatives, ne peut être étudiée avec précision qu'en utilisant un amplificateur continu. Celui-ci doit d'autre part posséder de très hautes performances, surtout en ce qui concerne le bruit.
 - Pour l'explication de la continuité des autres courbes (celles qui utilisent une coupure de fréquence), on peut invoquer deux raisons :
 - L'existence d'oscillations amorties à la fin de chaque bouffée turbulente. Celles-ci sont introduites par la suppression de la partie supérieure du spectre de fréquence nécessitée par la réduction du bruit de fond. Afin d'éliminer cette influence, une mesure a été faite en conservant une bande passante de plus de 100 KHz. Elle a nécessité l'emploi d'un fil de 1μ pour réduire au maximum la correction d'inertie thermique (Celle-ci amenant une augmentation notable du bruit).
- Le même résultat a été obtenu dans ces conditions :
- L'existence d'une "super-intermittence" à l'intérieur même du fluide turbulent. SANDBORN (8) a déjà signalé la possibilité d'un tel phénomène dans une couche limite. Nous reviendrons plus tard sur cette interprétation.

Mesure d'intermittence thermique

L'intermittence thermique a été mesurée dans un jet d'air chaud se développant aussi en atmosphère libre.

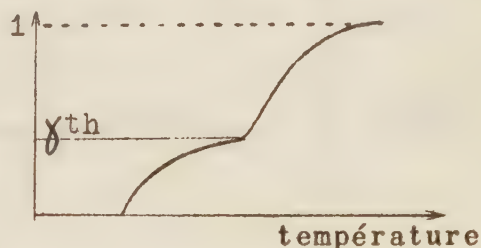
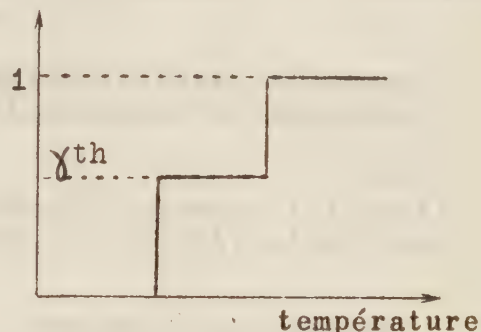
La sonde utilisée est également un fil de WOLLASTON mais, le courant le traversant doit être assez faible pour ne pas l'échauffer. Ainsi le fil n'est pratiquement sensible qu'aux variations de température du fluide dans lequel il se trouve plongé. Les deux figures ci-contre représentent respectivement :

- la courbe qui serait obtenue s'il n'y avait pas de mélange du jet avec le fluide ambiant, ni de transfert de chaleur par conduction.

- la courbe dans le cas d'une zone de mélange dont la température va en décroissant de l'intérieur vers l'extérieur.

La planche (7) donne une courbe réelle.

Elle permet une détermination assez précise de l'intermittence thermique. Celle-ci ne doit pas être confondue avec l'intermittence recherchée dans le paragraphe précédent, les limites thermiques et dynamiques du jet n'étant pas nécessairement superposées.



L'emploi de petits thermocouples augmenterait la sensibilité de cette mesure, mais leur réalisation est assez délicate. Voir à ce sujet : R.S.I. volume 32 Nb 3 Mars 1961.

Relevé de fonctions de répartition de vitesse

Cette mesure, effectuée point par point pour les différentes valeurs du seuil, fournit rapidement une estimation acceptable de la moyenne et de l'écart type des distributions sensiblement gaussiennes.

Les planches (7) et (8) donnent des fonctions de répartition pour deux positions de la sonde par rapport au jet :

- 1/ Dans une zone entièrement turbulente
- 2/ Dans une zone intermittente.

Ces essais ont également été faits en coupant la partie inférieure du spectre des fréquences.

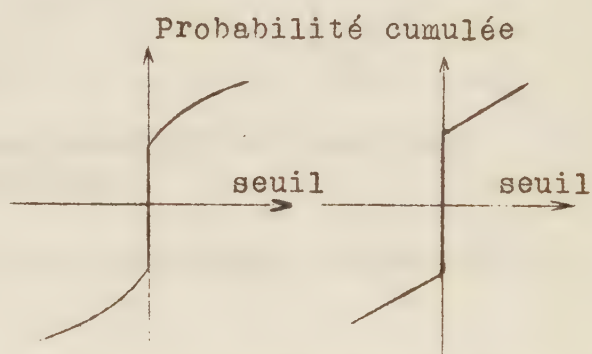
On constate ainsi

- que dans la zone entièrement turbulente la répartition des vitesses est sensiblement gaussienne (voir la représentation sur un quadrillage Gausso-arithmétique, planche 8).
- Qu'avec l'augmentation du temps passé à l'extérieur du jet, c'est-à-dire avec la diminution de χ , la loi de répartition des vitesses s'écarte de la loi gaussienne.
- Que l'introduction d'un filtrage des basses fréquences à l'intérieur du jet se traduit par un effet semblable.

Cette particularité tendrait à expliquer aussi l'impossibilité d'obtenir un résultat avec une discrimination de fréquence.

Les différentes courbes données dans la planche (7) confirment, une fois de plus, que l'hypothèse émise au départ, n'est pas vérifiée.

Dans le cas contraire, c'est-à-dire s'il existait un palier entre f_2 et f_3 dans la représentation de la page 36, les fonctions de répartition devraient présenter une discontinuité finie correspondant au temps pendant lequel la sonde est à l'extérieur du jet. Le signal prenant alors une valeur constante avec une probabilité finie $1 - \chi$ (résulte de la définition même du facteur d'intermittence).



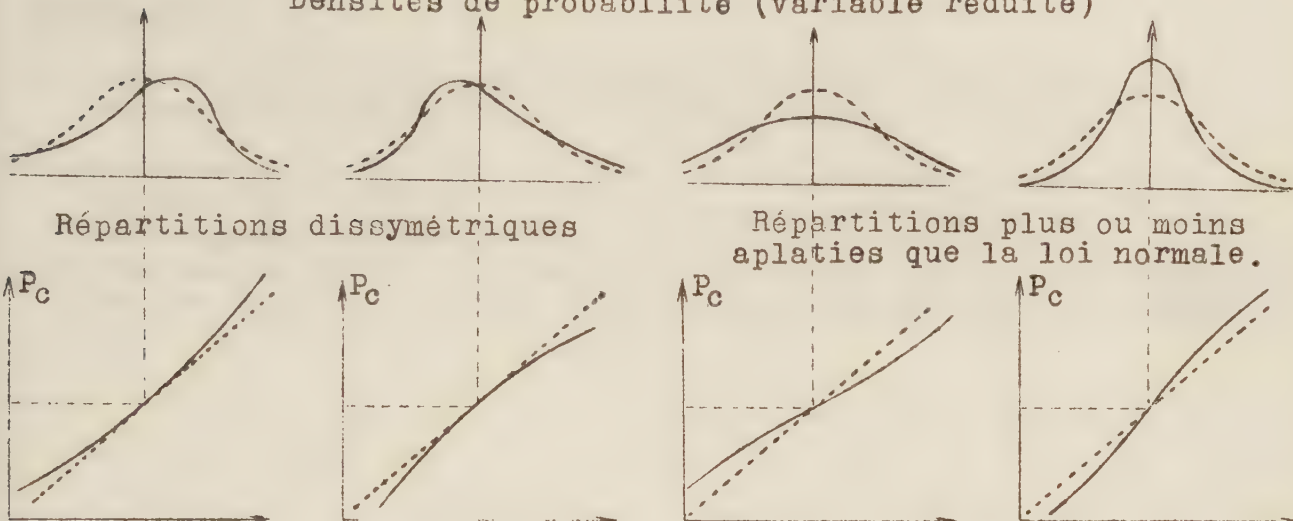
Les lois gaussiennes sont représentées par des droites dans le graphique de droite utilisant des coordonnées gausso-arithmétique

REMARQUE

Ces courbes de probabilités cumulées permettent aussi d'avoir une idée qualitative de la dissymétrie et de l'aplatissement de la répartition.

Les figures ci-dessous montrent les formes de courbes obtenues dans quelques cas.

Densités de probabilité (variable réduite)



Fonction de répartition (courbes de probabilités cumulées)
en coordonnées Gausso-arithmétique

Dans toutes ces figures, la loi gaussienne est portée en pointillés.

Mesures de densité de probabilité

Afin de contrôler l'hypothèse d'une "super-intermittence", un relevé de la densité de probabilité des vitesses à l'intérieur du jet, a été effectué, pour deux fréquences de coupure.

Les résultats sont portés sur la planche (9)

Le calcul du coefficient d'aplatissement a donné :

- pour le relevé sans filtrage des fréquences basses ,

$$T = 2,68$$

- pour la mesure dans laquelle les fréquences inférieures à 2 KHz, ont été supprimées :

$$T = 3,26$$

Tout semble donc se passer comme s'il existait une intermittence des zones à fréquences élevées (structures dissipatives de l'écoulement).

Remarques :

- 1) Les coefficients d'aplatissement vrais sont supérieurs à ces valeurs en raison des termes négligés dans le calcul.
- 2) Cette mesure, comme la précédente n'a pas tenu compte de la réponse non linéaire du fil chaud. Une correction devrait donc être apportée à partir de la courbe d'étalonnage du fil. Nous ne l'avons pas faite ici, puisque les courbes relevées à l'intérieur du jet, sans filtre, ne révélaient pas de dissymétrie notable.

CONCLUSIONS

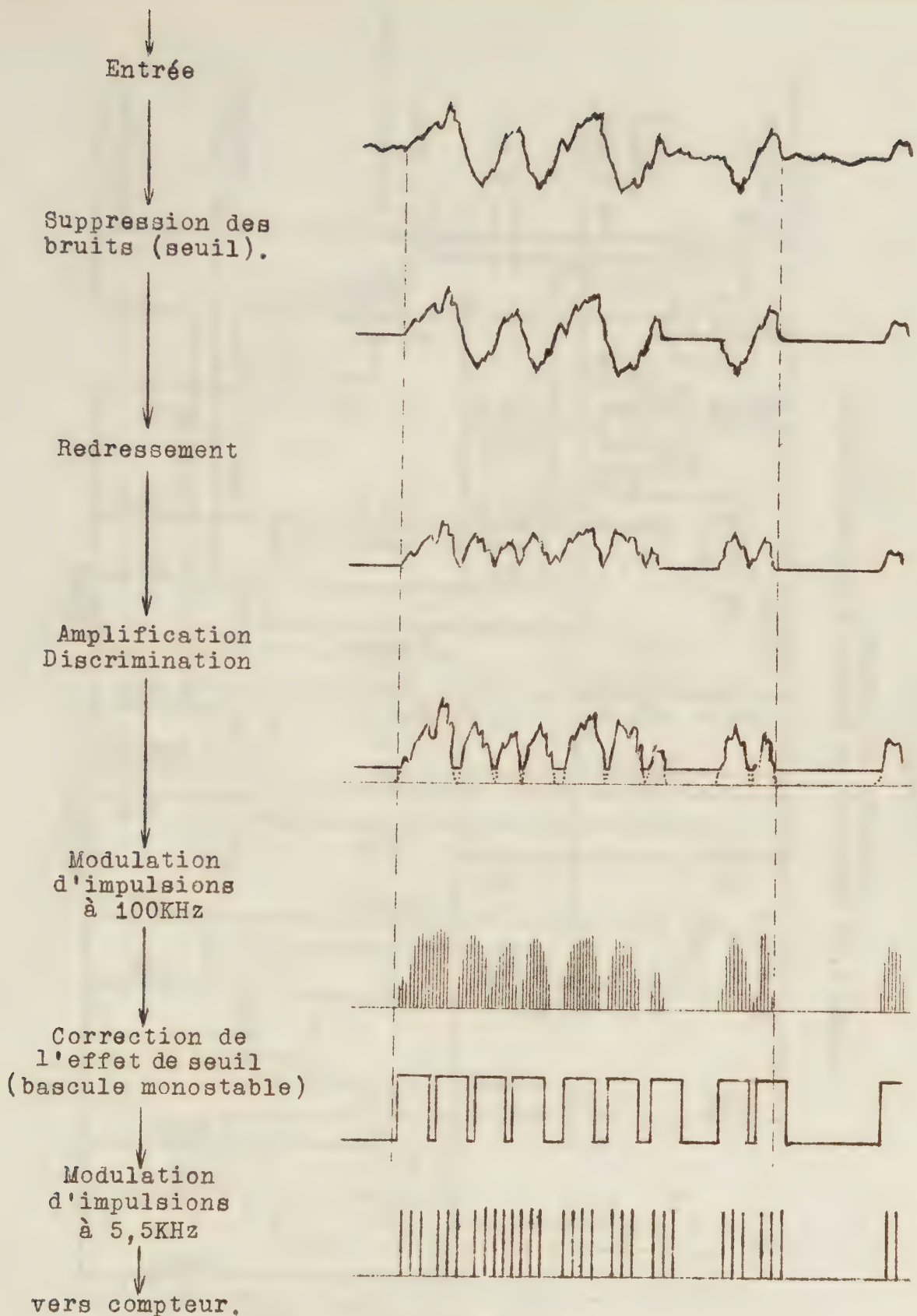
Après avoir apporté plusieurs modifications à l'appareil de JOHNSON, puis contrôlé le fonctionnement correct des nouveaux dispositifs utilisés, nous avons repris quelques mesures du facteur d'intermittence.

En conservant l'amplitude du signal pour critère de turbulence, nous avons retrouvé, comme CORRSIN & KISTLER, des courbes ne présentant aucun accident susceptible d'être utilisé pour le choix du seuil. Nous avons alors essayé sans plus de succès d'introduire une discrimination de fréquence.

L'impossibilité d'utiliser celle-ci comme critère de turbulence semble imputable à l'existence d'une " super-intermittence " ou tout autre phénomène se traduisant par des effets semblables à ceux actuellement choisis comme critères pratiques d'intermittence.

En définitive, le véritable problème qui reste à résoudre pour une mesure précise du facteur d'intermittence semble moins être un problème d'électronique que la recherche d'un critère de turbulence. Critère commodément accessible à la mesure et valable pour tout le champ d'écoulement.

Une étude systématique de la réponse intégrale d'une sonde (liaison continue) placée dans une zone intermittente pourrait être à la base de cette recherche. Techniquement, l'opération n'est d'ailleurs pas facile en raison de la petitesse des signaux fournis par un fil chaud.



Modifications successives d'un signal dans l'appareil de mesure du facteur d'intermittence.

Figure 1. Schematic diagram of the experimental setup for the study of the effect of the concentration of the solution on the rate of the reaction.



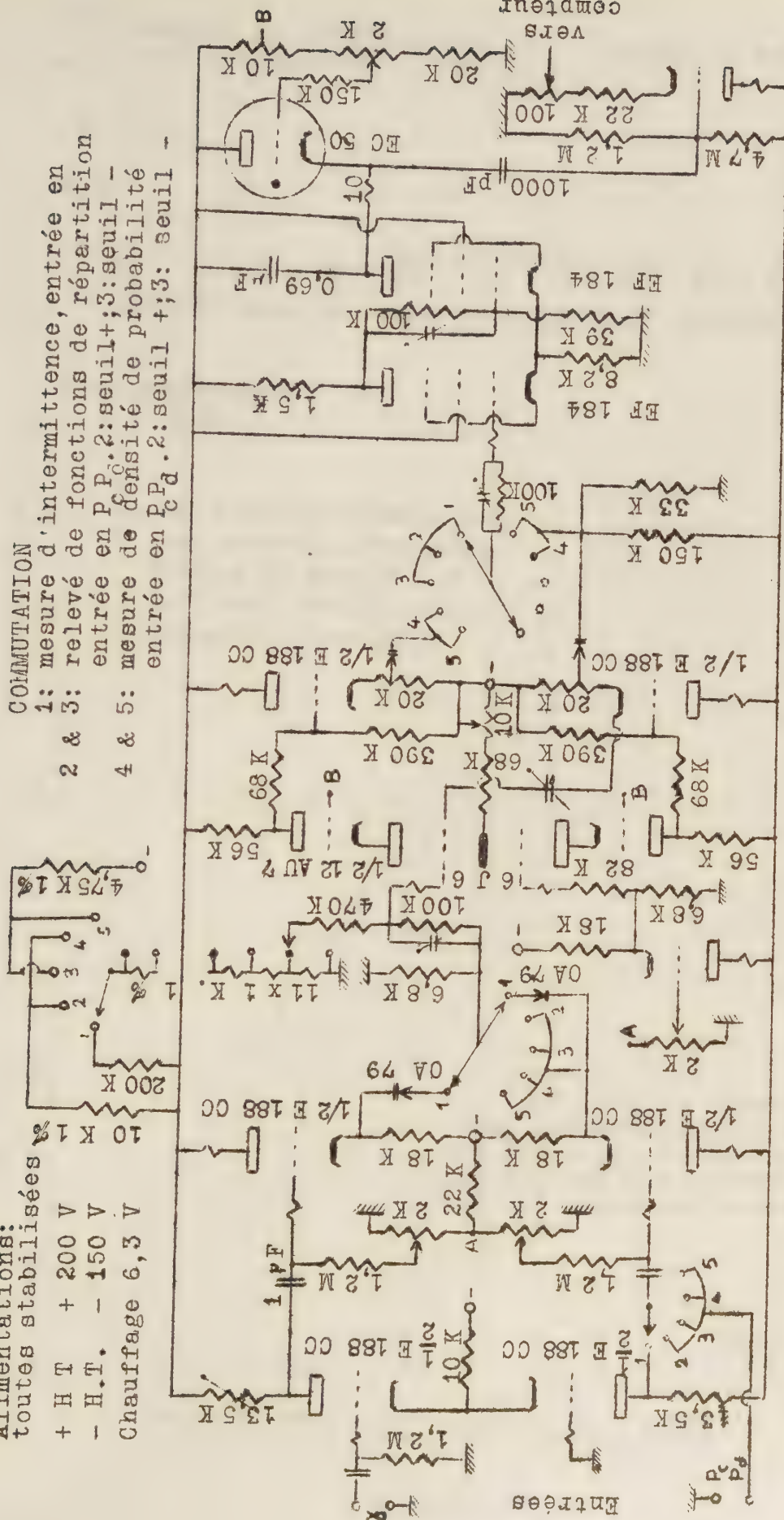
Alimentations:
toutes stabilisées

10 K 12

COMMUTATION

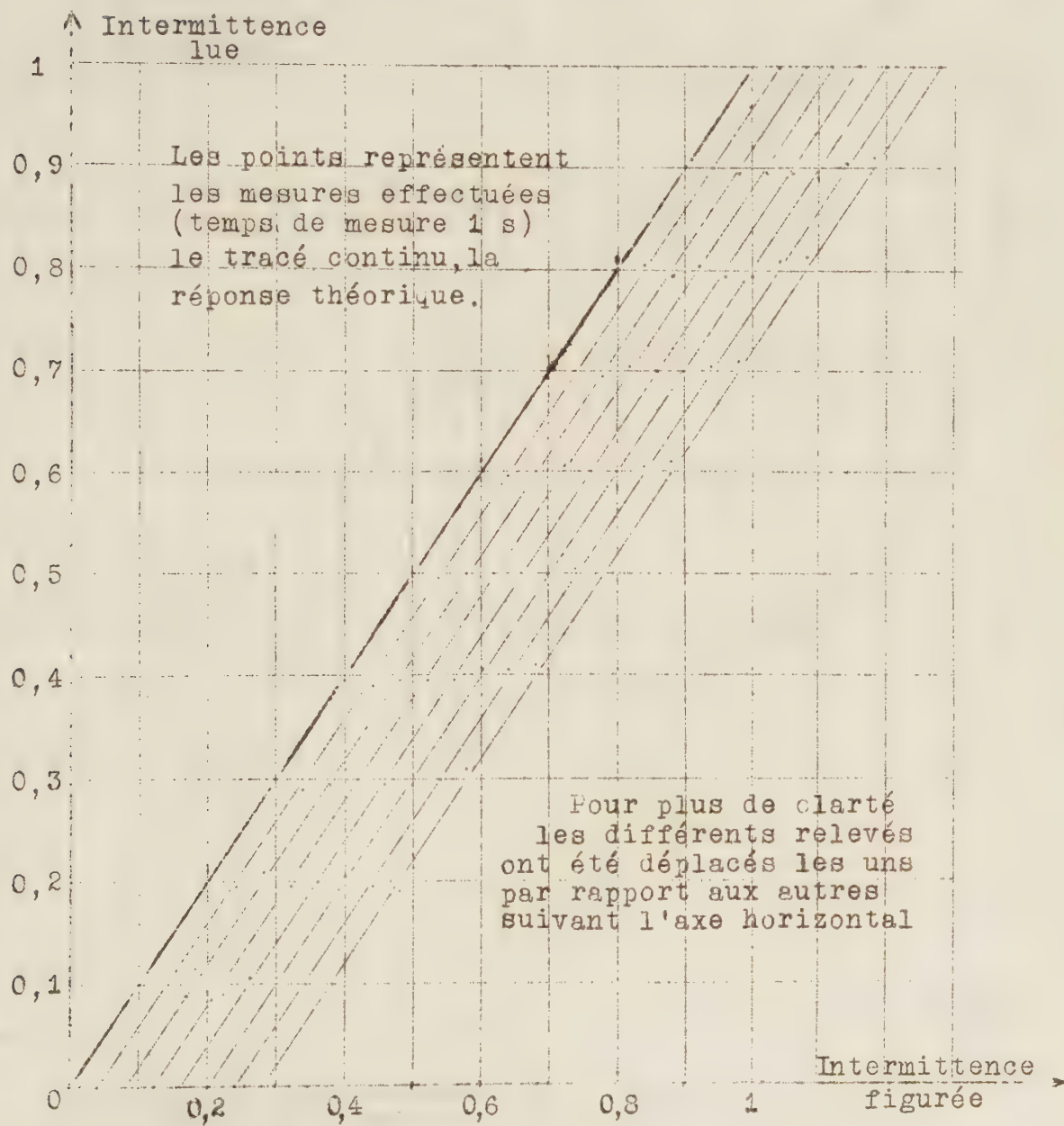
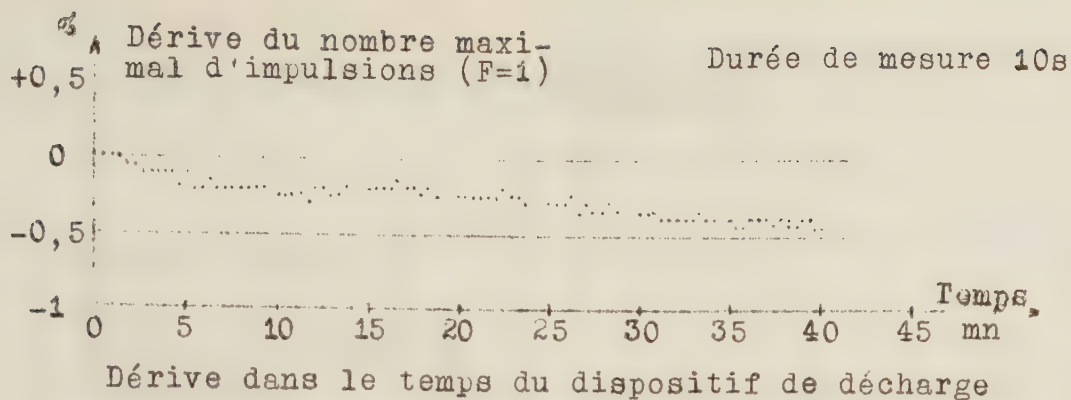
1: mesure d'intermittence, entrée en
2 & 3: relevé de fonctions de répartition
entrée en P_{C0} . 2: seuil +; 3: seuil -
4 & 5: mesure de densité de probabilité
entrée en P_{C0} . 2: seuil +; 3: seuil -

1: mesure d'intermittence, entrée en
2 & 3: relevé de fonctions de répartition
entrée en $P_{C,2}$: seuil+; 3: seuil -
4 & 5: mesure de densité de probabilité
entrée en $P_{C,2}$: seuil +; 3: seuil -

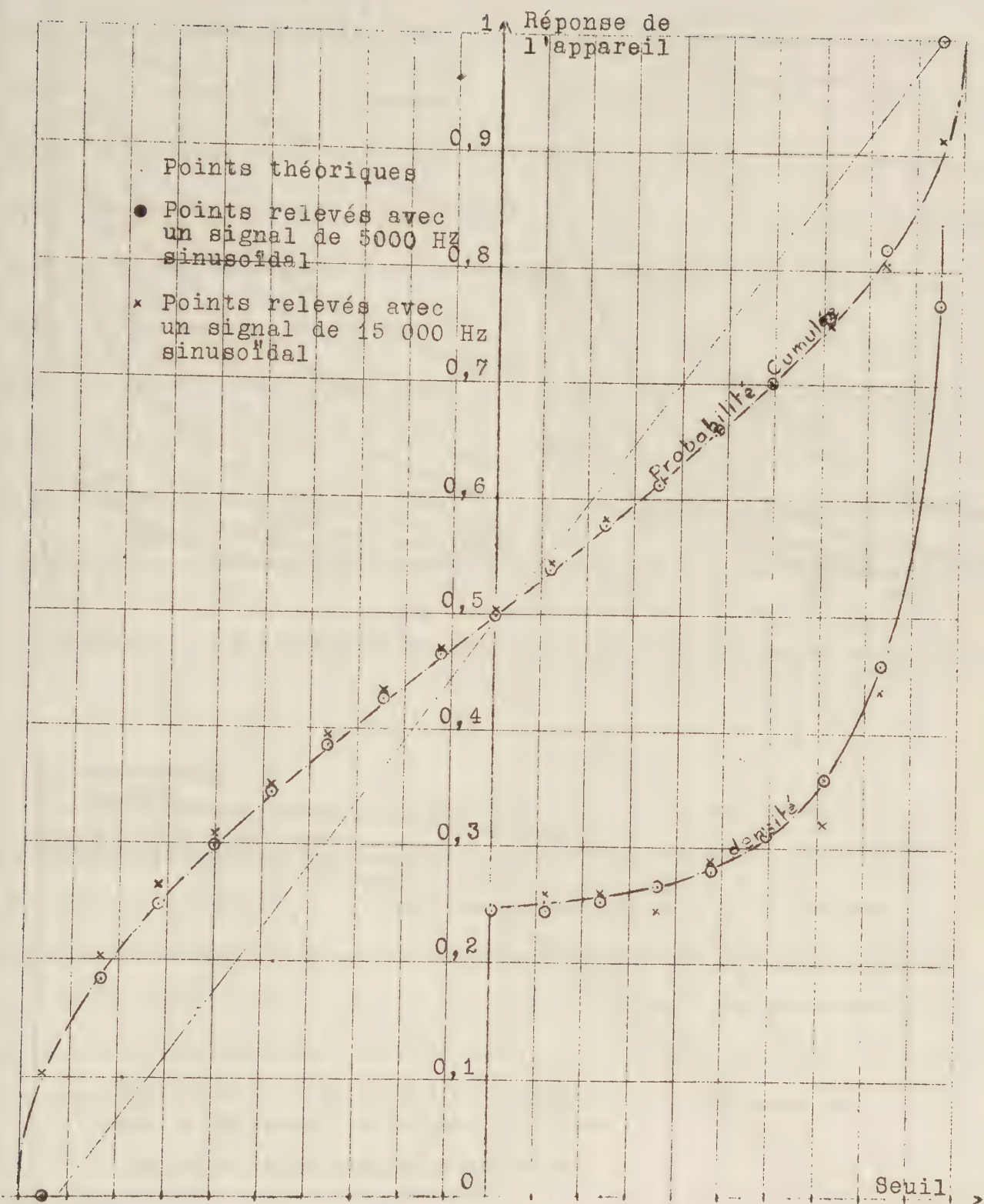


| Amplification
& symétrisation | Adaptation
Redressement | Seuil | Amplification =
Dédoublément
& adaptation
seuil (densité) | Discrimination
& intégration | Décharge
Mesure |
|----------------------------------|----------------------------|-------|--|---------------------------------|--------------------|
| | | | | | |

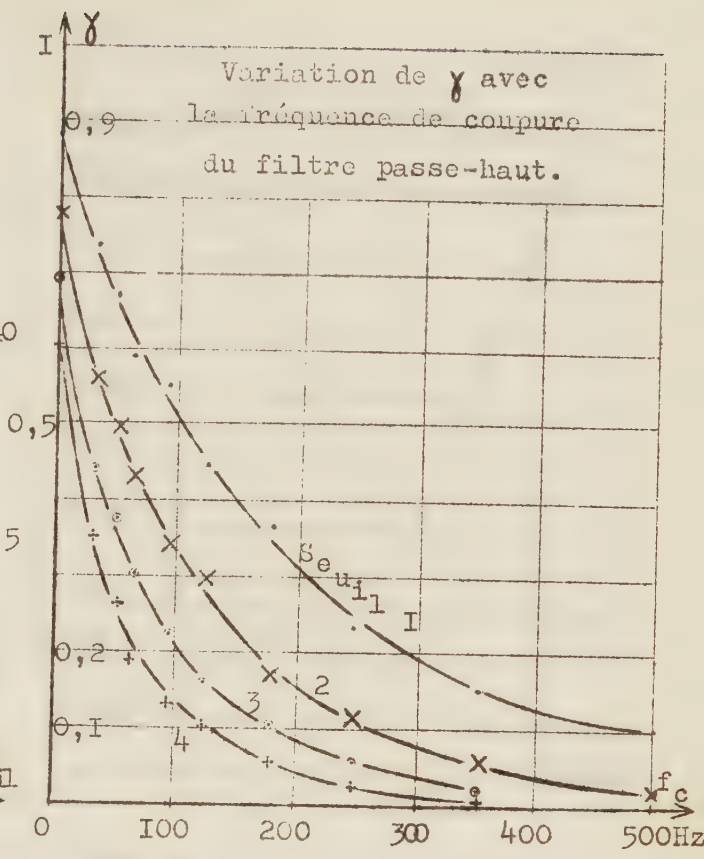
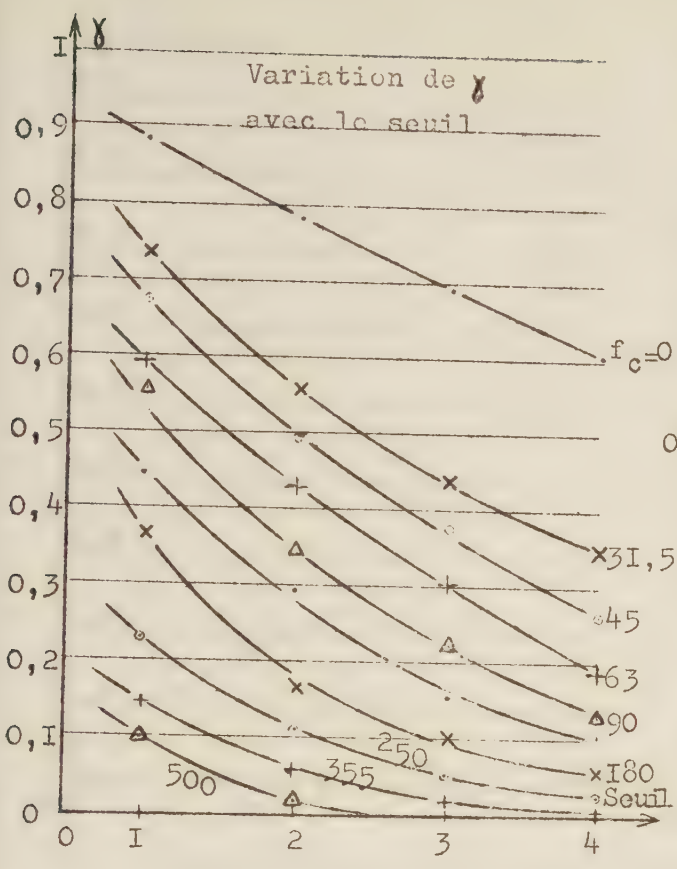
Schéma de l'appareil de mesure d'intermittence et de probabilité



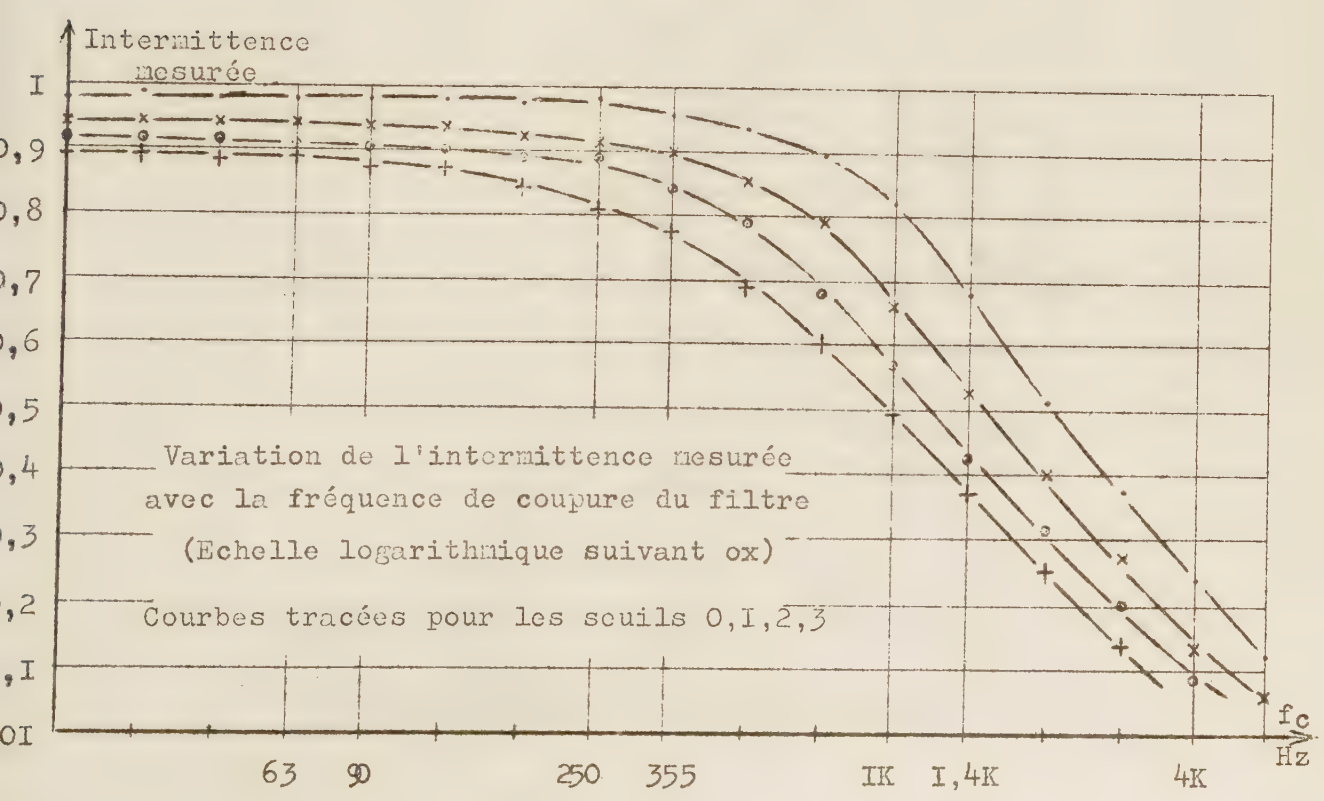
Contrôle du fonctionnement de l'appareil
 à l'aide d'un signal rectangulaire

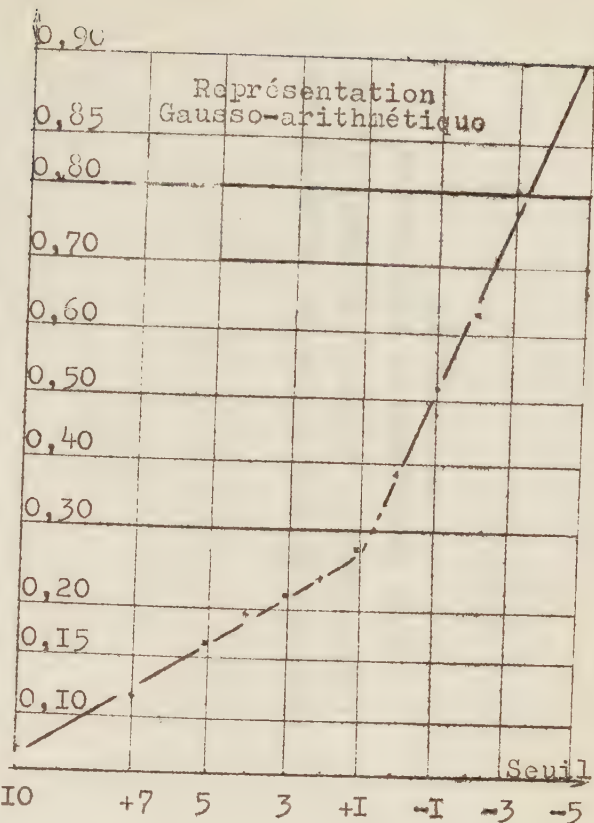
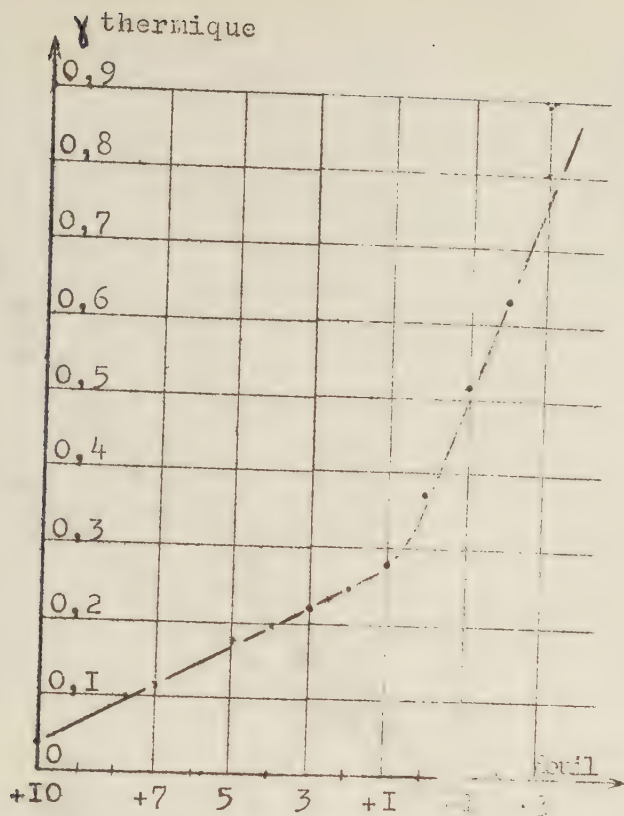


Contrôle du fonctionnement de l'appareil en mesures de Probabilité cumulée et de densité de probabilité

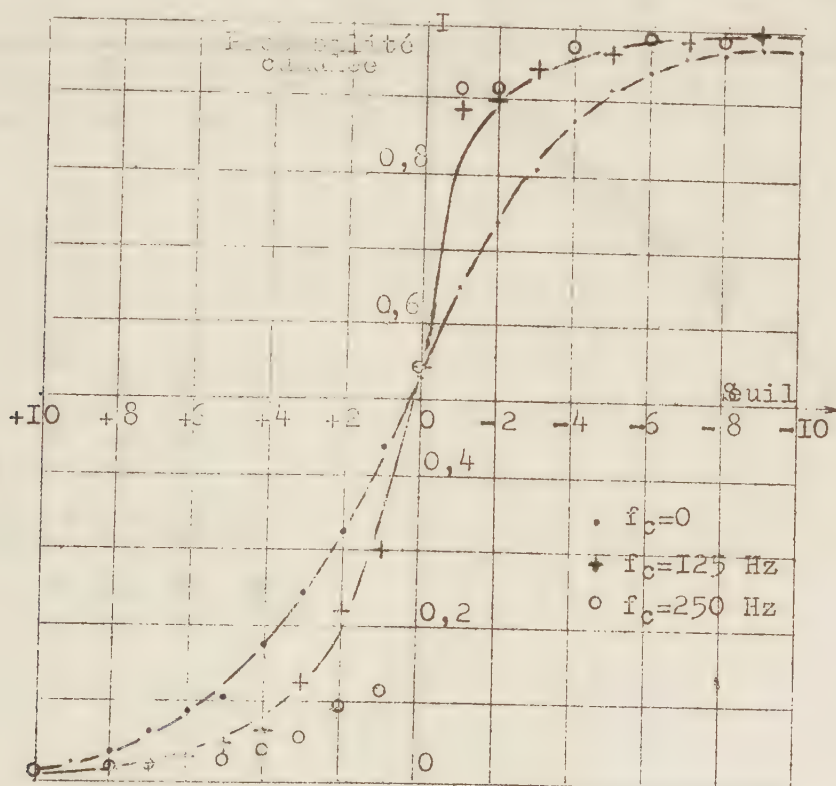


Variation de l'intermittence avec le seuil et la fréquence de coupure.



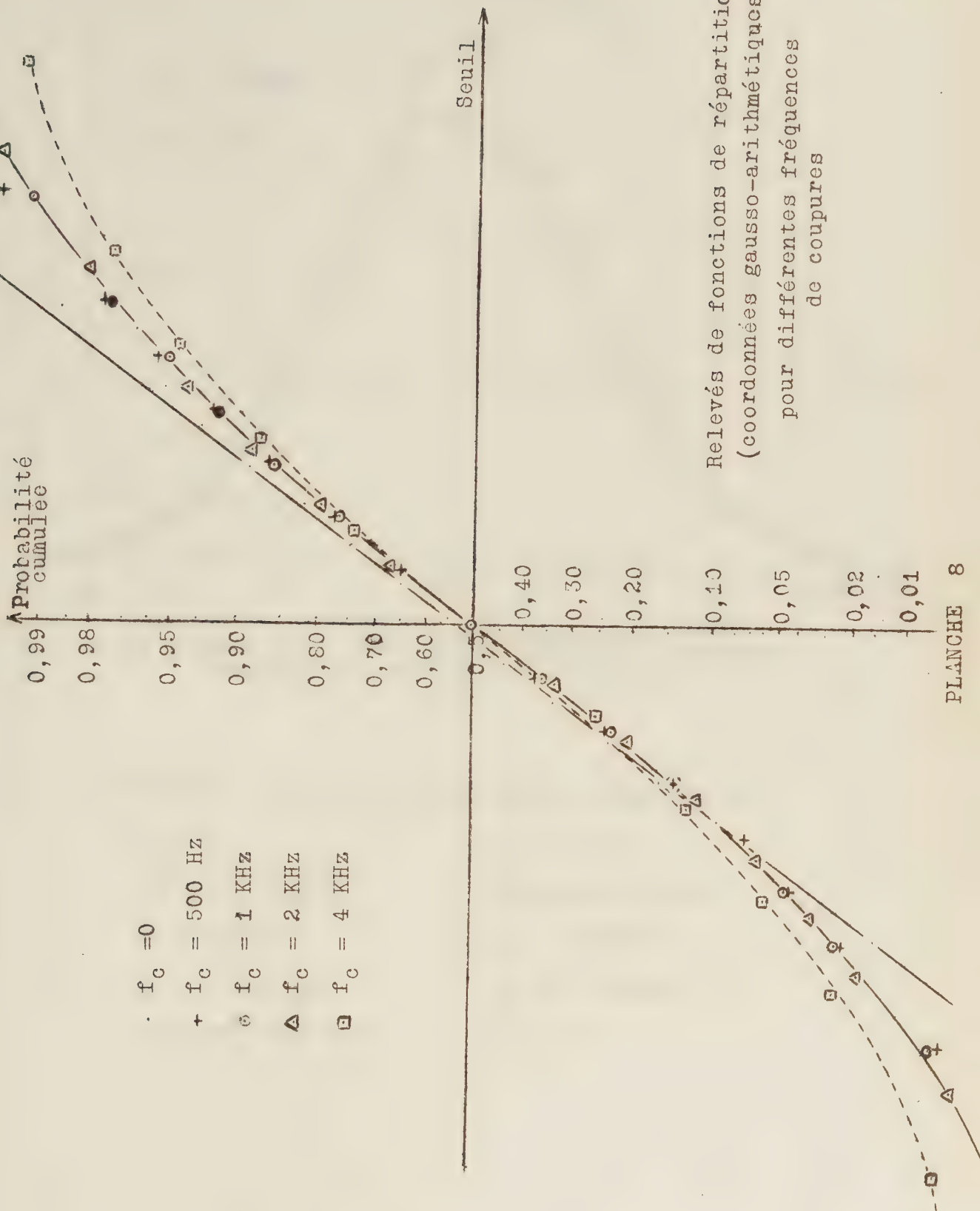


Intermittence thermique mesurée dans un jet d'air chaud.

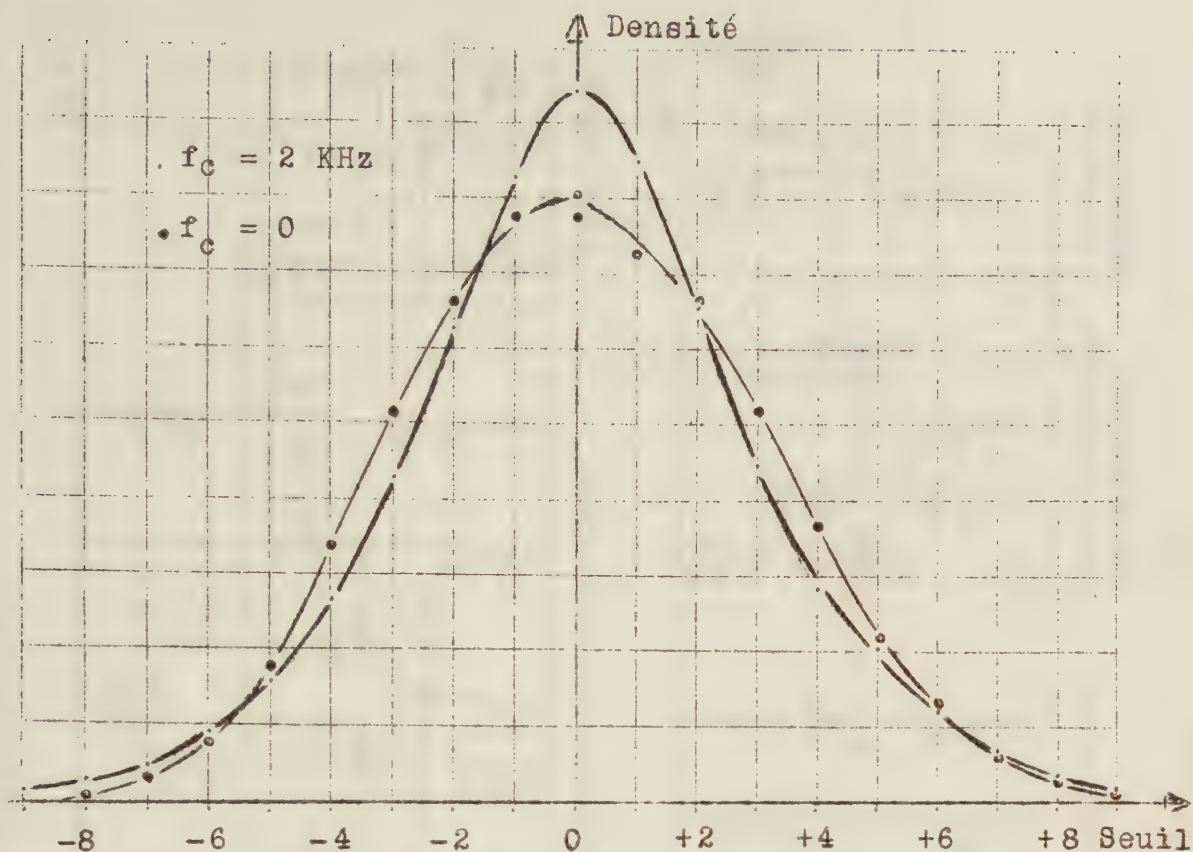


Fonction de répartition des vitesses dans un jet pour différentes fréquences de coupure.

- $f_c = 0$
- $f_c = 500 \text{ Hz}$
- $f_c = 1 \text{ KHz}$
- $f_c = 2 \text{ KHz}$
- $f_c = 4 \text{ KHz}$



Relevés de fonctions de répartition
(coordonnées gaussio-arithmétiques)
pour différentes fréquences
de coupures



Densité de probabilité pour le signal global
 et le signal privé des basses fréquences ($f_c = 2 \text{ KHz}$)
 Mesures faites dans l'axe du jet.

Grandeurs caractéristiques de ces répartitions:

$$f_c = 0$$

$$\text{moyenne} + 0,174$$

$$M_2 = 52\ 285$$

$$M_4 = 1\ 209\ 800$$

$$\text{Aplatis}^{nt} T = 2,68$$

$$f_c = 2 \text{ KHz}$$

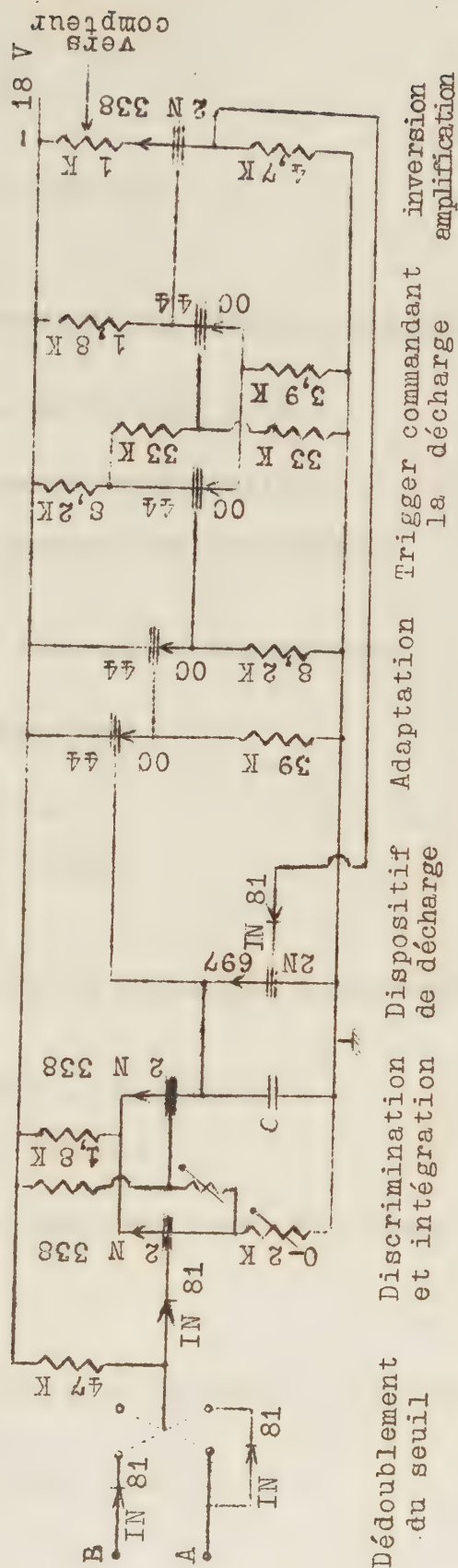
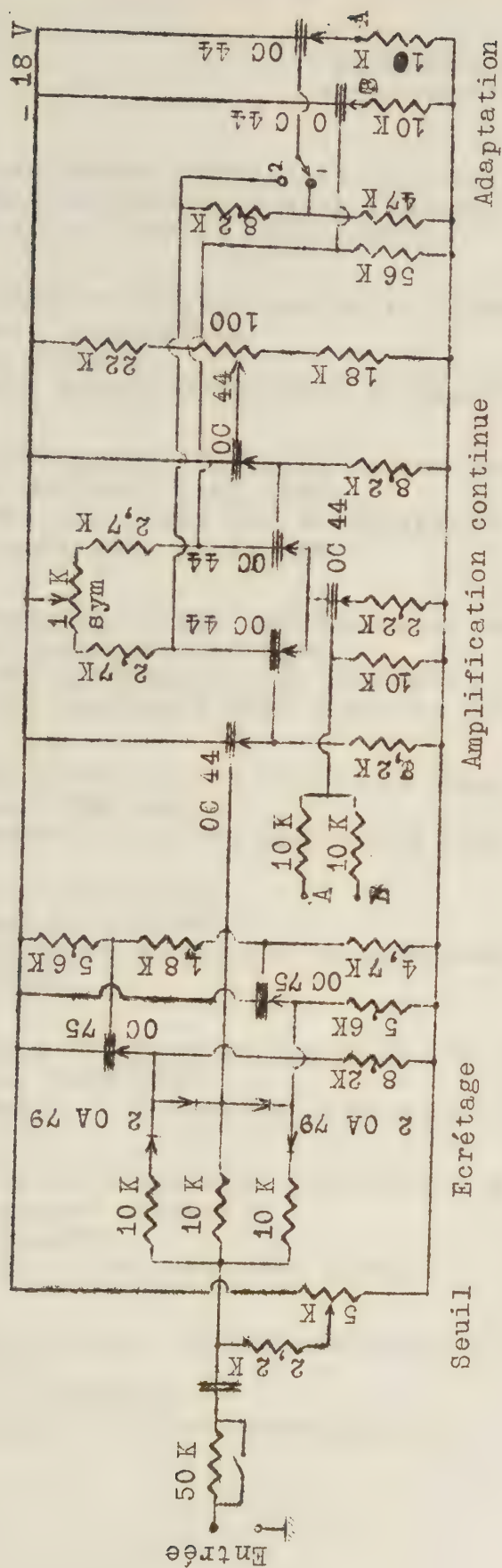
$$\text{moyenne} + 0,113$$

$$M_2 = 52\ 226$$

$$M_4 = 1\ 452\ 600$$

$$T = 3,26$$

VERSION TRANSISTORISEE



BIBLIOGRAPHIE
=====

- 1 - Free stream boundaries of turbulent flows.
Stanley CORRSIN & Alan KISTLER.
N.A.C.A. Report 1244 (1955).
- 2 - Turbulent heat transfer in a boundary layer with discontinuous wall temperature.
D. JOHNSON.
John Hopkin University Publication n° 55 Août 1955.
- 3 - Expérimental research on the mechanism of transition.
E. MATTIOLI & G. ZITO.
Advisory group for aeronautical research and development
Report 263 Avril 1960.
- 4 - Counting method and equipment for mean-value measurements in turbulence research.
H.W. LIEPMANN & M.S. ROBINSON.
Note Technique 3037 N.A.C.A. Octobre 1953.
- 5 - The structure of turbulent shear flow.
A.A. TOWNSEND.
Cambridge at the University Press (1956).
- 6 - Free trubulence.
Hans W. LIEPMANN.
Colloques du centre international de la Recherche Scientifique (1962)
- 7 - Local isotropy in the turbulent wake of a cylinder.
A.A. TOWNSEND.
Austr. J. Scientific Research 1 pp 161-174.
- 8 - Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient.
KLEBANOFF.
N.A.C.A. Report 1247 (1955).
- 9 - Measurements of intermittency of turbulent motion in a boundary layer.
V.A. SANDBORN.
Journal of fluid mechanics Vol. 6 Part 2 Août 1959.

BIBLIOGRAPHIE (suite)

- 10 - Les anémomètres à fil chaud et la mesure des fluctuations de vitesse et de température.
Geneviève COMTE-BELLOT
Séminaire de turbulence JABLONNA Octobre 1961.
- 11 - Quarterly progress report of aeronautics departement.
L.S.G. KOWASZNAY.
Contract Nord-8036-JHB-3D
The John Hopkin University, Jan 1-Mar. 31, 1950.

